

THÈSE

PRESENTÉE
A LA FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE PARIS
POUR OBTENIR
LE GRADE DE DOCTEUR-INGENIEUR PHYSIQUE
PAR

Ahmed ZEGADI

Sujet de la thèse :

HOLOGRAPHIE ACOUSTIQUE :
METHODE D'APPLICATION AUX SONDAGES.

Soutenue le 24 juin 1971 devant la Commission d'Examen

MM. CAGNIARD	Président
FRANÇON	} Examineurs
NOREL	
DESBRADES . .	
MECHLER	



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550410_0026

THÈSE

*PRESENTEE
A LA FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE PARIS
POUR OBTENIR
LE GRADE DE DOCTEUR-INGENIEUR PHYSIQUE
PAR*

Ahmed ZEGADI

Sujet de la thèse :

**HOLOGRAPHIE ACOUSTIQUE :
METHODE D'APPLICATION AUX SONDAGES.**

Soutenue le 24 juin 1971 devant la Commission d'Examen

<i>MM. CAGNIARD</i>	<i>Président</i>
<i>FRANÇON</i>	} <i>Examineurs</i>
<i>NOREL</i>	
<i>DESBRANDES . .</i>	
<i>MECHLER</i>	

AVANT-PROPOS

En présentant ce travail je tiens à remercier le Professeur CAGNIARD qui m'a fait l'honneur d'être Président de mon Jury et le Professeur FRANÇON d'avoir accepté d'en faire partie. Je remercie le Maître de Conférences NOREL d'avoir accepté d'être le rapporteur.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance au Maître de Recherches R. DESBRANDES d'avoir contribué à ma formation et d'avoir dirigé ce travail.

Que toutes les personnes ayant participés de près ou de loin en soient remerciées.

°
° °

Je remercie la Direction de l'I. F. P. , de l'E. N. S. P. M. et de la Division Production de m'avoir accordé une bourse et d'avoir permis l'utilisation des laboratoires, des ateliers, du banc optique de la Géophysique et du service électronique.

Ce projet a pu être conduit à son terme grâce à la participation financière de l'A. R. T. E. P.

L'I. A. P. a eu la gentillesse de me détacher le temps nécessaire à ces travaux, qu'il en soit remercié.



S O M M A I R E

I.	INTRODUCTION	1
II.	HOLOGRAPHIE OPTIQUE	2
II.1.	Généralités	2
II.2.	Les fondements mathématiques de l'holographie	2
	a) Enregistrement d'un hologramme	2
	b) Restitution de l'hologramme	5
	c) Commentaire sur l'équation qui reconstruit le front d'onde	6
II.3.	Propriétés des hologrammes	6
II.4.	Relations objet-image	6
II.5.	Grossissements et grandissements	9
	a) Grossissement angulaire	9
	b) Grandissement transversal	10
	c) Grandissement axial	10
	d) e, f, g, h, - Cas particuliers	10
II.6.	Les aberrations	13
II.7.	Résolution d'un hologramme	13
III.	HOLOGRAPHIE ACOUSTIQUE	14
III.1.	Généralités	14
III.2.	Technique d'enregistrement des hologrammes	14
	a) Déformation de la surface d'un liquide	14
	b) Balayage mécanique	15
	c) Balayage électronique	15
	d) Onde de référence	15
III.3.	Balayage simultané	16
	a) Formules de conjugaison	16
	b) Grandissement et grossissement	17
	1. Grandissement axial	17
	2. Grossissement angulaire	17
	3. Grandissement transversal	17

III. 4.	Dispositif particulier	18
III. 5.	Les aberrations	19
III. 6.	La résolution	19
III. 7.	Remarques (I)	20
III. 8.	Remarques (II)	21
III. 9.	Propriétés des hologrammes acoustiques	22
	a) Directivité d'un émetteur circulaire	22
	b) Sensibilité d'un récepteur circulaire	24
	c) Champ angulaire de vue	26
IV.	APPLICATION DE L'HOLOGRAPHIE ACOUSTIQUE DANS LES SONDAGES	28
IV. 1.	Principe	28
IV. 2.	Système holographique utilisé	29
IV. 3.	Géométrie de la sonde	30
IV. 4.	Technique d'enregistrement	31
	A. Balayage	31
	A. 1. Balayage horizontal	31
	A. 2. Balayage vertical	31
	A. 3. Vitesses de balayage	32
	A. 4. Déphasage introduit par le mouvement	32
	B. Electronique	34
	B. 1. Circuit d'émission	34
	B. 2. Circuit de réception	34
	B. 3. Etude du phénomène	35
	B. 4. Importance du signal de référence	37
	B. 5. Analyse mathématique dans le cas de nos expériences	38
IV. 5.	Technique de restitution	41
	A. 1. Formules utilisées pour le calcul des positions des images	41
	A. 2. Dispositif optique	43

V. PARAMETRES EXPERIMENTAUX	45
V.1. Choix de la fréquence	45
V.2. Milieu	45
V.3. Calcul des transducteurs	45
V.4. Période spatiale	46
V.5. Fréquence spatiale	47
V.6. Pas d'échantillonnage	47
V.7. Balayage - Vitesse de rotation - Vitesse de translation	47
VI. EXPERIENCES ET RESULTATS	49
VI.1. Système par transmission	49
A.1. Paramètres utilisés	50
A.2. Résultats obtenue avec ce type de dispositif	50
VI.2. Système par réflexion	51
B.1. Paramètres utilisés	51
B.2. Résultats obtenus avec ce type de dispositif	52
VI.3. Système par balayage simultané	52
C.1. Paramètres utilisés	52
C.2. Résultats	52
VII. PROJET DE SONDE HOLODIAGRAPHIQUE	55
a) Partie acoustique ou émission-réception	55
b) Partie électronique	55
c) Appareillage de surface	55
d) Restitution	56
VIII. CONCLUSION	57
Références bibliographiques.	60

NOTATIONS ET SYMBOLES

U_o : Amplitude complexe de l'onde objet

U_1 : Amplitude complexe de l'onde à l'émission

U_r : Amplitude complexe de l'onde de référence

U_c : Amplitude complexe de l'onde de restitution

E_o : Amplitude de l'onde objet

E_1 : Amplitude de l'onde à l'émission

E_r : Amplitude de l'onde de référence

E_c : Amplitude de l'onde de restitution

φ_o : Phase de l'onde objet

φ_1 : Phase de l'onde à l'émission

φ_r : Phase de l'onde de référence

φ_c : Phase de l'onde de restitution

$$U = U_o + U_r$$

$I(x,y)$: Intensité lumineuse

T : Facteur de transmission en amplitude

T_n : Facteur de transmission en amplitude du négatif

T_p : Facteur de transmission en amplitude du positif

M : Facteur de transmission en intensité

W : Energie

t : Temps

D : Densité de la plaque photographique

γ : Pente de la courbe de Hurter - Drieffild

λ_o : Longueur d'onde à l'enregistrement

λ_c : Longueur d'onde à la restitution

$$\mu = \frac{\lambda_c}{\lambda_o}$$

m = $m_o \times m_L$ Facteur de réduction

m_o : Facteur de réduction oscilloscope

m_L : Facteur de réduction laboratoire

R_o : Distance de l'objet à l'hologramme

R_r : Distance de la source de référence à l'hologramme

R_c : Distance de la source de restitution à l'hologramme

R_l : Distance de l'émetteur à l'objet

G_a : Grossissement angulaire

G_t : Grandissement transversal

G_A : Grandissement axial

S : Aberration sphérique

C_x : Aberration coma
 C_y

A_x
 A_y : Aberration astigmatisme

$A_{x,y}$

$$P = \frac{V_e}{V_r}$$

V_e : Vitesse émetteur

V_r : Vitesse récepteur

Δ	:	Résolution linéaire
$\Delta\theta$	:	Résolution angulaire
$G(\theta, \psi)$	:	Amplitude sonore
$I(\theta, \psi)$	:	Intensité sonore
θ, ψ	:	Angles polaires
J_1	:	Fonction de Bessel de 1 ^{ère} espèce
R	:	Rayon des transducteurs (transducteurs circulaires)
L	:	Longueur des transducteurs (transducteurs linéaires)
Δy	:	Pas d'échantillonnage
f	:	Distance focale de l'hologramme
F	:	Fréquence
e	:	Epaisseur des transducteurs
D_o	:	Diamètre de l'émetteur
d_o	:	Diamètre du récepteur
P	:	Période spatiale
β	:	Demi-angle de réception (du récepteur)
ξ	:	Fréquence spatiale
n	:	Nombre de lignes
X	:	Longueur de l'hologramme
l	:	Dimension de l'objet
L_o	:	Constante
ρ	:	Rayon du cercle balayé

$\rho_o = \frac{\rho}{m}$: Rayon du cercle du support d'hologramme pour un facteur de réduction "m"

(μ, η, ζ) : Coordonnées de l'émetteur (dans le cas du balayage simultané)

- $*$: Indique les quantités complexes

Les indices $^+$ montrent simplement qu'on a affaire à l'image réelle dans le cas du + et à l'image virtuelle dans le cas du -.

I. INTRODUCTION

La visualisation de la paroi d'un sondage peut être obtenue actuellement grâce au B.H.T.V. (Bore-Hole-Televiwer) ou téléviseur sonique de fond (réf.1).

Il suffit d'éclairer la paroi du puits avec un émetteur piézoélectrique et d'utiliser ce même émetteur pour la réception du signal réfléchi par la paroi.

L'amplitude du signal reçu est fonction des propriétés physiques de la surface de la roche éclairée. Si la roche était homogène l'amplitude resterait constante, mais dès que les propriétés physiques de cette roche changent, il y a variation de l'amplitude du signal. En particulier, tous les paramètres restant constants par ailleurs, l'existence d'une fracture atténue le signal.

Pour rendre cette variation du signal visible, on module avec le spot d'un oscilloscope. C'est ce qui nous donne l'image de la paroi.

Avec la technique holographique que l'on se propose d'étudier, il est possible de donner une image tridimensionnelle de la paroi du puits et de voir même à l'intérieur de la formation qui entoure le puits, en trou ouvert, ou bien de visualiser le ciment derrière un tubage éventuel.

II. HOLOGRAPHIE OPTIQUE

II.1. Généralités

L'holographie est une technique de restitution d'images comprenant deux stades successifs :

a) D'une part, l'enregistrement d'un hologramme qui n'est autre que l'enregistrement du phénomène d'interférence composé par deux ondes lumineuses cohérentes sur une plaque photographique.

b) D'autre part, la lecture de cet hologramme par une onde lumineuse cohérente que l'on appellera onde de restitution.

Le phénomène d'interférence est créé par une onde réfléchie ou diffractée par l'objet à holographier et que l'on appellera onde objet, et une onde provenant directement de la source et que l'on appellera onde de référence.

Cette technique fut utilisée par Gabor en 1948 (réf. 2) dans le but d'augmenter la résolution du microscope électronique, mais ne fut réellement développée que lorsque l'on découvrit le laser (réf. 3).

II.2. Les fondements mathématiques de l'holographie

Avant d'entreprendre cette étude, nous supposons que les conditions de cohérence et de monochromatisme des ondes sont réalisées.

Théorie (réf. 4, 5, 6)

a) Enregistrement d'un hologramme

Soient respectivement $U_r(x, y)$ et $U_o(x, y)$ les amplitudes complexes des faisceaux d'onde de "référence" et "objet".

$$U_r(x, y) = E_r(x, y) e^{-i \varphi_r(x, y)}$$

$$U_o(x, y) = E_o(x, y) e^{-i \varphi_o(x, y)}$$

Et supposons que l'on place une plaque photographique (H) dans la zone commune aux deux faisceaux.

L'amplitude complexe d'un point quelconque enregistré sur la plaque photographique sera :

$$U(x, y) = U_r(x, y) + U_o(x, y) \quad (1)$$

Comme le détecteur physique (plaque photographique) n'est sensible qu'à l'intensité, nous aurons :

$$I(x, y) = U(x, y) \cdot U(x, y)^* \quad (2)$$

En remplaçant $U(x, y)$ par (1) il vient :

$$I(x, y) = [U_r(x, y) + U_o(x, y)] [U_r(x, y) + U_o(x, y)]^* \quad (3)$$

L'astérisque $*$ indique les quantités complexes conjuguées.

De même en remplaçant $U_o(x, y)$ et $U_r(x, y)$ par leur valeur on aura :

$$I(x, y) = E_r^2(x, y) + E_o^2(x, y) + 2 E_r(x, y) E_o(x, y) \cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y)]$$

- Transmission en amplitude (réf. 7, 8)

Définissons le facteur de transmission en amplitude (T) de la plaque comme étant le rapport de l'amplitude complexe émergente de la plaque à celle de l'incidente sur la plaque (dans les calculs on considèrera l'amplitude incidente égale à 1).

Le facteur correspondant à une transmission en intensité sera :

$$M = T \cdot T^*$$

Définissons la quantité $D = -\log_{10} M = -\log_{10} T T^*$ comme étant la densité de la plaque.

Le produit $W = I \cdot t$ est l'énergie que reçoit la plaque, "t" étant le temps de pose.

Etant donné que M et T sont fonction de I on en déduit la courbe D en fonction de $\log_{10} W$ appelée courbe de Hurter-Drieffild (fig. 1).

Nous poserons " γ " comme étant la pente de la courbe sur la partie linéaire

La densité du négatif est donnée par :

$$D = D_o + \gamma \log_{10} \frac{W}{W_o}$$

D_o et W_o sont des constantes.

En utilisant l'équation $D = -\log_{10} M$ on aura :

$$M = M_o \left(\frac{W}{W_o} \right)^{-\gamma}$$

Le facteur de transmission en amplitude du négatif T_n sera :

$$T_n = \left[k_n (I)^{1/2} \right]^{-\gamma_n}$$

k_n étant proportionnel au temps t .

Supposons que l'on prenne le positif du cliché négatif, le facteur de transmission en amplitude sera :

$$T_p = \left\{ k_p \left[k_n (I)^{1/2} \right]^{-\gamma_n} \right\}^{-\gamma_p} \quad (5)$$

avec $\gamma = \gamma_n, \gamma_p$ et $K = k_p^{-\gamma_p} \cdot k_n^{\gamma}$

Le facteur de transmission est fonction de I et de γ (pente de la courbe caractéristique de l'émulsion).

Supposons $K = 1$ d'où $T_p = I^{\frac{\gamma}{2}}$

soit :

$$T = \left[U_r U_r^* + U_o U_o^* + U_r U_o + U_r U_o^* \right]^{\frac{\gamma}{2}} \quad (6)$$

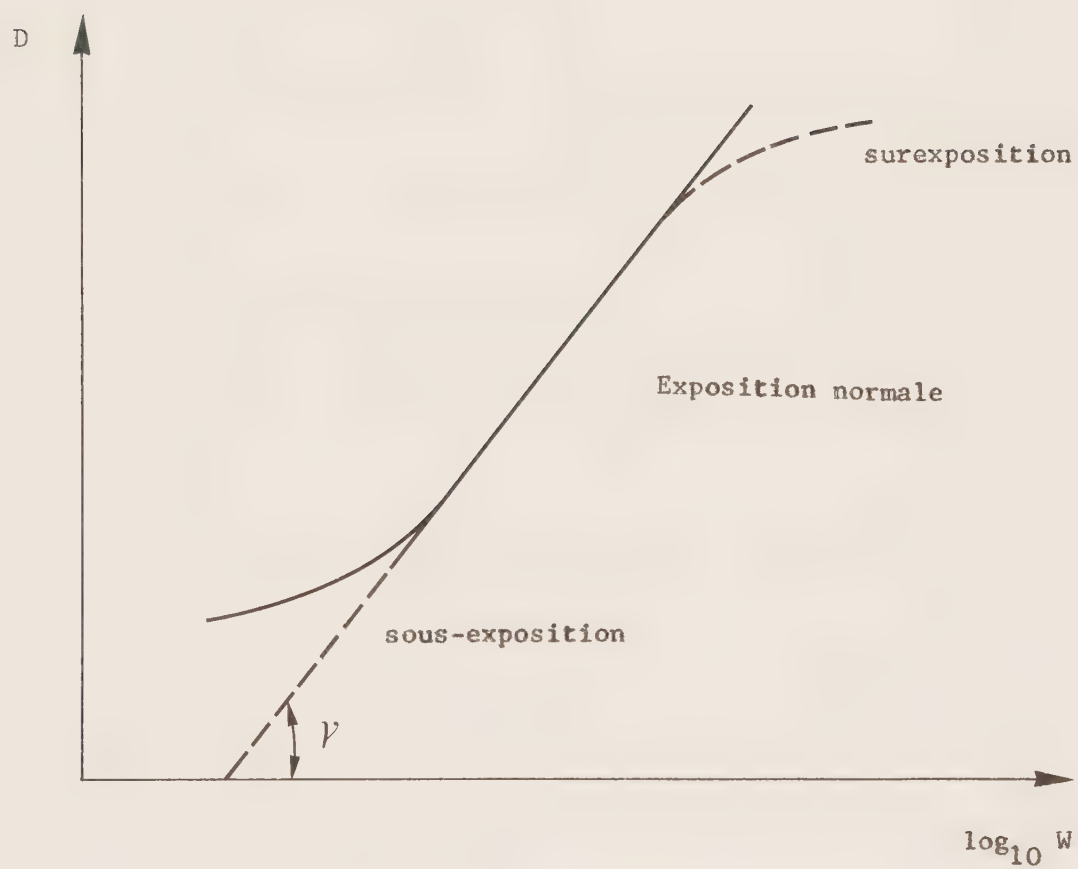


FIG. 1 - COURBE DE HURTER - DRIFFIELD

Supposons que $|U_r| \gg |U_o|$ (7)

Nous aurons le développement suivant de (T)

$$T = |U_r|^\gamma \left[1 + \frac{\gamma}{2} \left| \frac{U_o}{U_r} \right|^2 + \frac{\gamma}{2} \frac{U_o U_r^*}{|U_r|^2} + \frac{\gamma}{2} \frac{U_o^* U_r}{|U_r|^2} + \dots \right] \quad (8)$$

Nous voyons que pour $\gamma = 2$ l'équation (8) s'écrit :

$$T = U_r^2 + U_o^2 + U_o U_r^* + U_o^* U_r \quad (9)$$

$$T = E_r^2(x, y) + E_o^2(x, y) + 2 E_r(x, y) E_o(x, y) \cos [\varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y)] \quad (10)$$

Dans cette équation, nous avons l'amplitude E_o et la phase φ_o de l'onde objet.

b) Restitution de l'hologramme (fig. 2)

Eclairons la plaque photographique (après l'avoir développée) avec une onde cohérente :

$$U_c = E_c e^{-i \varphi_c}$$

L'amplitude lumineuse transmise par l'hologramme est U_i avec

$$U_i = U_c \cdot T$$

En remplaçant T par l'équation (8)

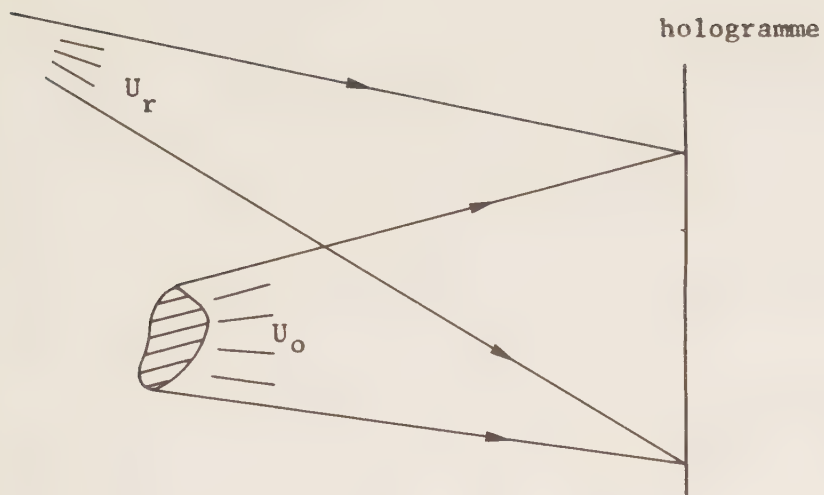
$$U_i = U_c |U_r|^\gamma \left[1 + \frac{\gamma}{2} \left| \frac{U_o}{U_r} \right|^2 + \frac{\gamma}{2} \frac{U_o U_r^*}{|U_r|^2} + \frac{\gamma}{2} \frac{U_o^* U_r}{|U_r|^2} + \dots \right]$$

soit :

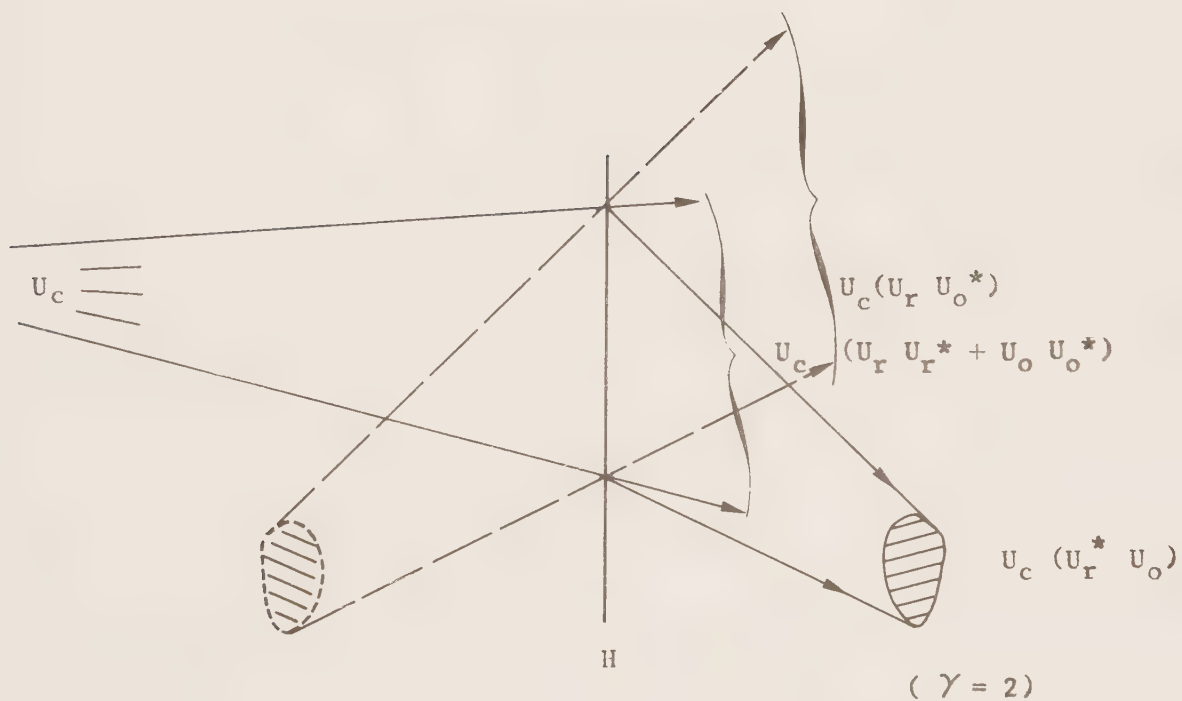
$$U_i = U_c |U_r|^\gamma + \frac{\gamma}{2} U_c |U_r|^\gamma \left| \frac{U_o}{U_r} \right|^2 + \frac{\gamma}{2} U_c |U_r|^\gamma \frac{U_o U_r^*}{|U_r|^2} + \frac{\gamma}{2} U_c |U_r|^\gamma \frac{U_o^* U_r}{|U_r|^2} \dots (11)$$

et pour $\gamma = 2$

$$U_i = U_c \left[U_r^2 + U_o^2 \right] + U_c U_r^* U_o + U_c U_r U_o^* \quad (12)$$



ENREGISTREMENT



RECONSTRUCTION

FIG. 2

- Le premier terme représente pratiquement l'onde incidente puisque le facteur $U_r^2 + U_o^2$ est presque toujours constant.
- Le deuxième terme représente l'image réelle au facteur près $U_c U_r$ *
- Le troisième terme représente l'image conjuguée par rapport à l'image réelle.

L'équation (12) peut d'ailleurs s'écrire sous la forme :

$$U_i = E_c e^{-i \varphi_c} [E_r^2 + E_o^2] + E_c E_r e^{i(\varphi_r - \varphi_c)} E_o e^{-i \varphi_o} + E_c E_r e^{-i(\varphi_r + \varphi_c)} E_o e^{i \varphi_o}$$

c) Commentaires sur les équations 11 et 12

1. Pour $\gamma \neq 2$ nous avons le développement (11)
2. Les longueurs d'ondes à l'enregistrement et à la restitution peuvent être différentes (question que l'on traitera surtout dans le domaine acoustique).
3. Dans le raisonnement précédent, on a supposé que l'hologramme était plan, en fait il n'est pas nécessaire que l'hologramme épouse une surface particulière (nous verrons par la suite le cas où l'hologramme épouse la forme d'un demi cylindre).

II. 3. Propriétés des hologrammes

- a) Etant donné que l'onde issue d'un point de l'objet couvre tout l'hologramme, il est possible d'effectuer une restitution de l'objet en entier en utilisant simplement une partie de l'hologramme.
- b) L'hologramme permet la restitution à 3 dimensions.

II. 4. Relations objet-image (réf. 9, 10)

Soit $A_q (X_q, Y_q, Z_q)$ un point qui représentera l'objet, la source de référence, la source de restitution, l'image suivant que l'indice "q" est remplacé par "0" "r" "c" "i".

Tout d'abord rappelons l'équation qui reconstruit le front d'onde original (pour $\gamma = 2$).

$$U_i = U_c \left[U_o^2 + U_r^2 \right] + U_c U_r^* U_o + U_c U_r U_o^*$$

Les termes qui nous intéressent sont :

$$U_{i+} = U_c \left[U_r^* U_o \right] \quad U_{i-} = U_c \left[U_r U_o^* \right] \quad (15)$$

avec

$$U_{i+} = E_i e^{-i \varphi_{i+}}$$

$$U_{i-} = E_i e^{-i \varphi_{i-}}$$

$$U_c = E_c e^{-i \varphi_c}$$

$$U_r = E_r e^{-i \varphi_r}$$

$$U_o = E_o e^{-i \varphi_o}$$

Soit en remplaçant dans l'équation (15)

$$E_i = E_r E_o E_c$$

$$\varphi_{i+} = \varphi_c - \varphi_r + \varphi_o \quad (16)$$

$$\varphi_{i-} = \varphi_c + \varphi_r - \varphi_o$$

Un point $A_q (x_q, y_q, z_q)$ illuminé par une onde de longueur d'onde λ_q a pour déphasage φ_q , par rapport au récepteur $M(x, y)$, tel que : (fig. 3)

$$\varphi_q = \frac{2 \pi}{\lambda_q} r_q \quad (17)$$

$$\text{avec } r_q = \left[(x - x_q)^2 + (y - y_q)^2 + z_q^2 \right]^{1/2}$$

$$R_q = \left[x_q^2 + y_q^2 + z_q^2 \right]^{1/2}$$

Après développement il vient :

$$\varphi_q = \frac{2\pi}{\lambda_q} \left[R_q + \frac{x^2 + y^2 - 2xx_q - 2yy_q}{2R_q} - \frac{1}{8R_q^3} (\dots) \right] \quad (18)$$

Supposons que l'on réduise l'hologramme par le facteur "m" tel que (x, y) soient remplacés par $(\frac{x}{m}, \frac{y}{m})$ et que la reconstruction se fasse avec une longueur d'onde λ_c différente de celle à l'enregistrement λ_o et posons $\mu = \frac{\lambda_c}{\lambda_o}$

Remplaçons (16) par (18) il vient, en ne tenant compte que des termes du 1er ordre seulement :

$$\frac{1}{R_{i+}} = \frac{1}{R_c} + \frac{\mu}{m^2} \left[\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} \right] \quad (19)$$

$$\frac{1}{R_{i-}} = \frac{1}{R_c} - \frac{\mu}{m^2} \left[\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} \right]$$

et

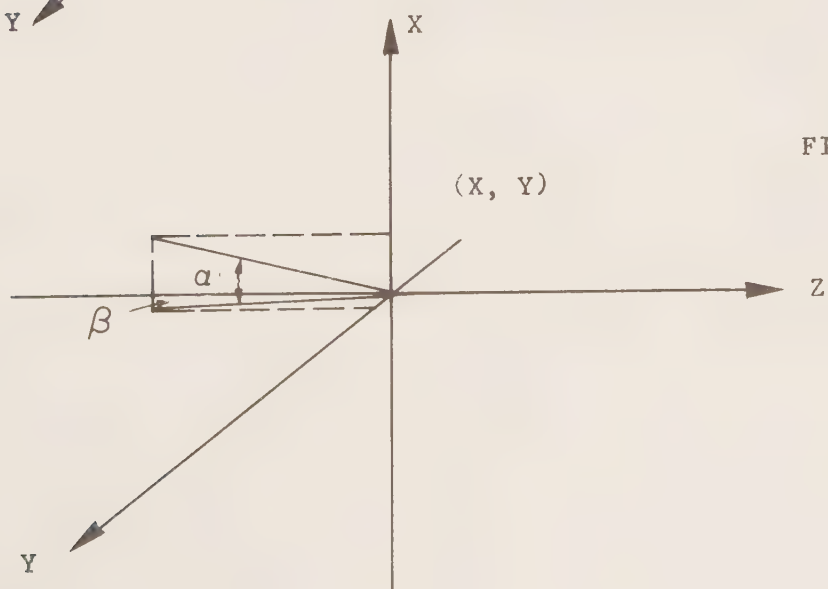
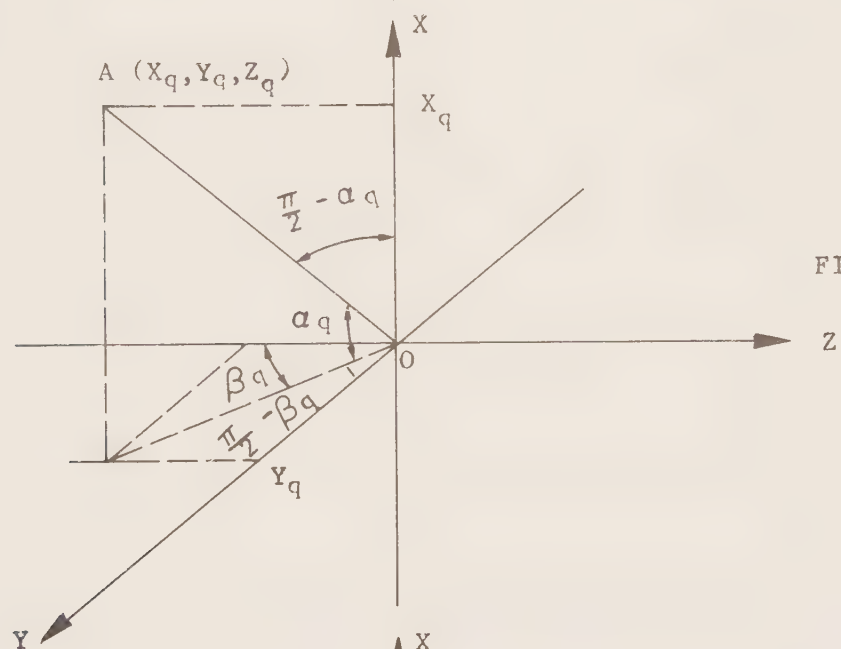
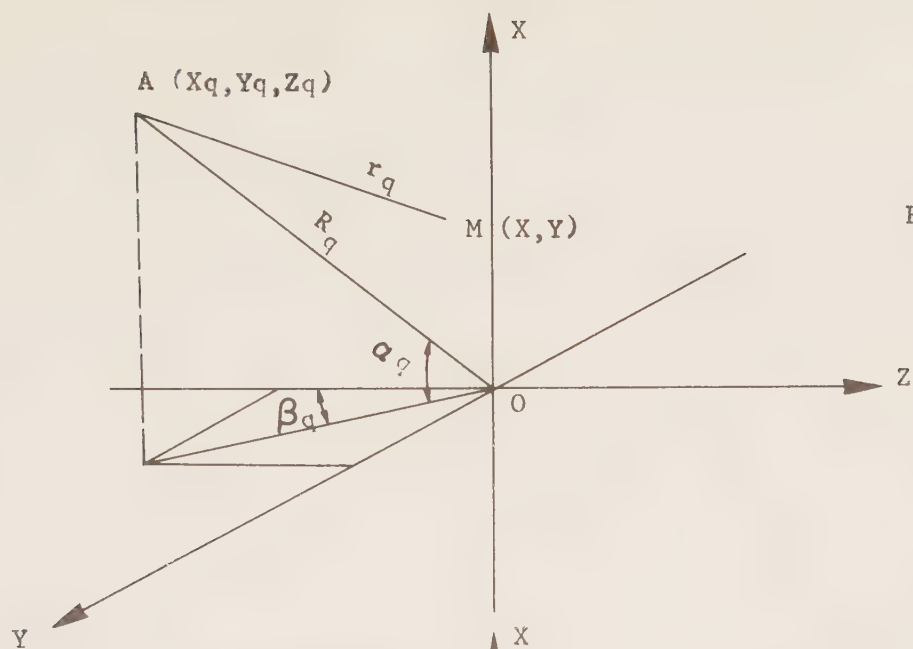
$$\frac{x_i}{R_{i+}} = \frac{x_c}{R_c} + \frac{\mu}{m} \left[\frac{x_o}{R_o} - \frac{x_r}{R_r} \right]$$

$$\frac{y_i}{R_{i+}} = \frac{y_c}{R_c} + \frac{\mu}{m} \left[\frac{y_o}{R_o} - \frac{y_r}{R_r} \right]$$

d'où les relations suivantes : (voir fig. 4)

$$\sin \alpha_{i+} = \sin \alpha_c + \frac{\mu}{m} \left[\sin \alpha_o - \sin \alpha_r \right]$$

$$\sin \alpha_{i-} = \sin \alpha_c - \frac{\mu}{m} \left[\sin \alpha_o - \sin \alpha_r \right]$$



En tenant compte de la fig. 4

$$\cos \alpha_{i+} \sin \beta_{i+} = \cos \alpha_c \sin \beta_c + \frac{\mu}{m} \left[\cos \alpha_o \sin \beta_o - \cos \alpha_r \sin \beta_r \right] \quad (20)$$

$$\cos \alpha_{i-} \sin \beta_{i-} = \cos \alpha_c \sin \beta_c - \frac{\mu}{m} \left[\cos \alpha_o \sin \beta_o - \cos \alpha_r \sin \beta_r \right]$$

Nous remarquons que (α_q, β_q) varient de $(\pm \frac{\pi}{2})$

Donc pour qu'il y ait formation de l'image il faut que l'on ait :

$$\sin^2 \alpha_{i+} + \sin^2 \beta_{i+} - \cos^2 \alpha_{i+} < 1$$

Cas où les $\sin \alpha_q, \sin \beta_q$ se confondent avec tg . (approximation paraxiale)
et les $\cos \alpha_q, \beta_q$ avec les cotg . (fig. 5)

Les équations (20) s'écrivent :

$$\text{tg} \alpha_{i+} = \text{tg} \alpha_c + \frac{\mu}{m} \left[\text{tg} \alpha_o - \text{tg} \alpha_r \right]$$

$$\text{cotg} \alpha_{i+} \text{tg} \beta_{i+} = \text{cotg} \alpha_c \text{tg} \beta_c + \frac{\mu}{m} \left[\text{cotg} \alpha_o \text{tg} \beta_o - \text{cotg} \alpha_r \text{tg} \beta_r \right]$$

Nous voyons dans ce cas qu'il n'est plus nécessaire de satisfaire à l'inégalité précédente car la tg et la cotg varient de $-\infty$ à $+\infty$

II.5. Grossissement et Grandissement

a) Grossissement angulaire (Ga) suivant les deux directions α et β :
Il sera défini comme :

$$\frac{d(\alpha_{i+})}{d \alpha_o} \quad \text{et} \quad \frac{d(\beta_{i+})}{d \beta_o}$$

soit :

$$\frac{d(\alpha_i^+)}{d\alpha_o} = \pm \frac{\mu}{m} \left[\frac{\cos \alpha_o}{\cos \alpha_i^+} \right] \quad (21)$$

$$\frac{d(\beta_i^+)}{d\beta_o} = \pm \frac{\mu}{m} \frac{\cos \alpha_o \cos \beta_o}{\cos \alpha_i^+ \cos \beta_i^+}$$

b) Grandissement transversal (G_t) suivant les deux directions α et β :
Il sera défini comme :

$$G_{t_\alpha}^+ = \frac{R_i^+ d(\alpha_i^+)}{R_o d\alpha_o} ; \quad G_{t_\beta}^+ = \frac{R_i^+ \cos \alpha_i^+ d(\beta_i^+)}{R_o \cos \alpha_o d\beta_o}$$

soit :

$$\frac{R_i^+ d(\alpha_i^+)}{R_o d\alpha_o} = \frac{\cos \alpha_o}{\cos \alpha_i^+} \left[\frac{m}{1 \pm \left(\frac{m^2 R_o}{\mu R_c} - \frac{R_o}{R_r} \right)} \right] \quad (22)$$

et

$$\frac{R_i^+ \cos \alpha_i^+ d(\beta_i^+)}{R_o \cos \alpha_o d\beta_o} = \frac{\cos \beta_o}{\cos \beta_i^+} \left[\frac{m}{1 \pm \left(\frac{m^2 R_o}{\mu R_c} - \frac{R_o}{R_r} \right)} \right]$$

c) Grandissement axial (G_A) défini tel que :

$$G_A^+ = \frac{d(R_i^+)}{dR_o} = \pm \frac{1}{\mu} \left[\frac{m}{1 \pm \left(\frac{m^2 R_o}{\mu R_c} - \frac{R_o}{R_r} \right)} \right]^2 \quad (23)$$

d) Cas où $\lambda_c = \lambda_o$ et $\alpha_q = \beta_q = 0$ et $m = 1$

Les équations (19) s'écrivent :

$$\frac{1}{R_i^+} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r}$$

$$\frac{1}{R_i^-} = \frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_r}$$

Les équations (21) s'écrivent :

$$(G_a^\pm) = \frac{d(\alpha_i^\pm)}{d\alpha_o} = \frac{d(\beta_i^\pm)}{d\beta_o} = 1$$

Les équations (22) s'écrivent :

$$(G_t^\pm) = \frac{R_i^\pm d(\alpha_i^\pm)}{R_o d\alpha_o} = \frac{R_i^\pm \cos \alpha_i^\pm d(\beta_i^\pm)}{R_o \cos \alpha_o d\beta_o} = \left[\frac{1}{1 \pm \left(\frac{R_o}{R_c} - \frac{R_o}{R_r} \right)} \right] = \pm \frac{R_i^\pm}{R_o}$$

Les équations (23) s'écrivent :

$$G_{A^\pm} = \frac{d(R_i^\pm)}{dR_o} = \pm \left[\frac{1}{1 \pm \left(\frac{R_o}{R_c} - \frac{R_o}{R_r} \right)} \right]^2 = \left[\frac{R_i^\pm}{R_o} \right]^2$$

e) Cas où $R_r = R_c = \infty$; $\mu = \frac{\lambda_c}{\lambda_o} = 1$; $\alpha_q = \beta_q = 0$; $m = 1$

$$R_i^\pm = \pm R_o \quad \varphi_i^\pm = \pm \varphi_o \quad (23')$$

$$G_a^\pm = \pm 1$$

$$G_t^\pm = \pm 1$$

$$G_{A^\pm} = 1$$

f) Cas où $R_r = R_c = \infty$; $\mu = \frac{\lambda_c}{\lambda_o} \neq 1$; et $m = \mu$

$$R_{i+} = + \frac{\lambda_c}{\lambda_o} \cdot R_o$$

$$G_{a+} = + 1$$

$$G_{t+} = m = \mu = \frac{\lambda_c}{\lambda_o}$$

$$G_{A+} = m$$

$$\text{soit } G_{t+} = G_{A+}$$

C'est la condition de stigmatisme rigoureux.

$$g) \mu = \frac{\lambda_c}{\lambda_o} \neq 1 \text{ et } m \neq \mu$$

(23)

$$\frac{1}{R_{i+}} = + \frac{\mu}{m^2} \cdot \frac{1}{R_o}$$

$$h) \text{ si : } m = \mu = \frac{\lambda_c}{\lambda_o}$$

Nous aurons :

$$\frac{1}{R_{i+}} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{m} \left[\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} \right]$$

$$G_{t+} = \frac{R_{i+}}{R_o}$$

$$G_{A+} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{R_{i+}}{R_o} \right]^2$$

II.6. Les aberrations.

Elles seront données par les termes de 3e ordre du développement (18)
soit :

$$\varphi_i^+ (3e \text{ ordre}) = \varphi_c (3e \text{ ordre}) \pm \left[\varphi_o (3e \text{ ordre}) - \varphi_r (3e \text{ ordre}) \right]$$

Nous aurons les mêmes aberrations qu'en imagerie classique (sphérique, coma, astigmatisme, courbure, ...)

- Sphérique :

$$S = \frac{1}{R_c^3} \pm \frac{\mu}{m^4} \left(\frac{1}{R_o^3} - \frac{1}{R_r^3} \right) - \frac{1}{R_i^3}$$

- Coma :

$$C_x = \frac{x_c}{R_c^3} \pm \frac{\mu}{m^3} \left(\frac{x_o}{R_o^3} - \frac{x_r}{R_r^3} \right) - \frac{x_i}{R_i^3} \quad \text{et} \quad C_y = \frac{y_c}{R_c^3} \pm \frac{\mu}{m^3} \left(\frac{y_o}{R_o^3} - \frac{y_r}{R_r^3} \right) - \frac{y_i}{R_i^3}$$

- Astigmatisme :

$$A_x = \frac{x_c^2}{R_c^3} - \frac{\mu}{m^2} \left(\frac{x_o^2}{R_o^3} - \frac{x_r^2}{R_r^3} \right) - \frac{x_i^2}{R_i^3}$$

$$A_y = \frac{y_c^2}{R_c^3} - \frac{\mu}{m^2} \left(\frac{y_o^2}{R_o^3} - \frac{y_r^2}{R_r^3} \right) - \frac{y_i^2}{R_i^3}$$

$$A_{xy} = \frac{x_c y_c}{R_c^3} - \frac{\mu}{m^2} \left(\frac{x_o y_o}{R_o^3} - \frac{x_r y_r}{R_r^3} \right) - \frac{x_i y_i}{R_i^3}$$

II.7. Résolution d'un hologramme (Réf. 11)

Si nous supposons que les sources sont des points et que l'hologramme est circulaire de diamètre "d" la distance minimum résolvable entre deux points de l'objet sera donnée par :

$$\Delta = 1,22 \frac{R_o \lambda_o}{d}$$

Si l'hologramme a une dimension $X_{\max}$ suivant les X , $\Delta = \frac{\lambda_o R_o}{X_{\max}} (23''')$

III. HOLOGRAPHIE ACOUSTIQUE

III.1. Généralités

Etant donné que la variable lumineuse en holographie optique est un scalaire , ceci a entraîné son extension à l'acoustique.

Pour satisfaire à l'holographie , nous l'avons montré dans cette première partie , il faut que :

- a) l'objet soit éclairé par des ondes cohérentes
- b) les ondes modulées par l'objet soient mélangées avec d'autres ondes cohérentes.
- c) la figure d'interférence qui en résulte forme un hologramme
- d) l'image visible soit restituée à partir de l'hologramme par diffraction d'une lumière cohérente.

Les conditions (a) et (b) sont réalisées en acoustique, la condition (c) le sera à partir du moment où on transforme l'énergie acoustique en énergie lumineuse. La condition (d) est la même pour l'holographie optique qu'acoustique.

Remarques : plusieurs problèmes apparaissent dès que l'on veut travailler en acoustique:

d'une part il n'y a pas d'équivalent de la plaque photographique.

d'autre part, une grande différence entre les longueurs d'onde à l'enregistrement et à la reconstruction, d'où les distorsions qui en résultent.

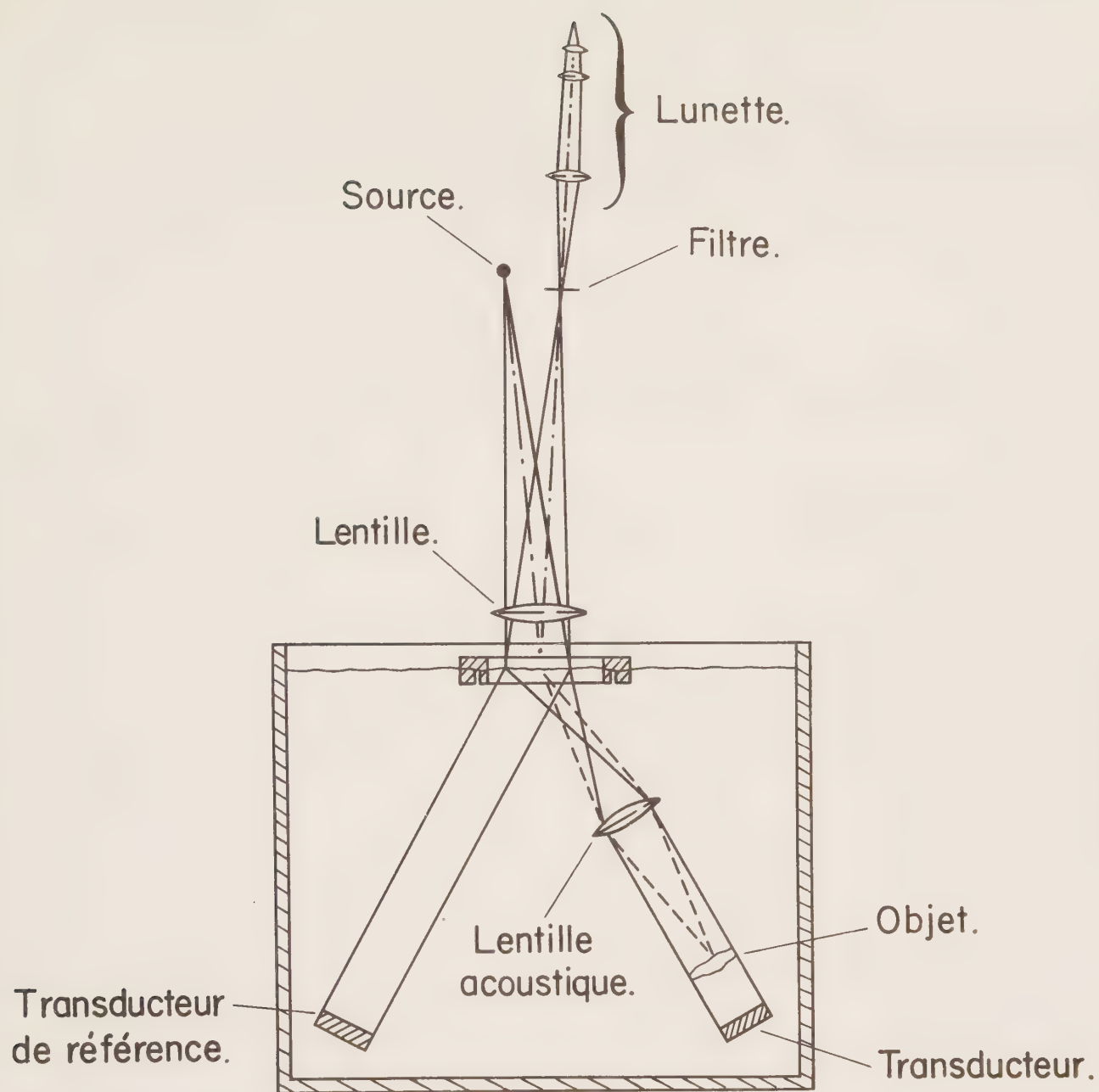
L'holographie acoustique est encore au stade de laboratoire.

II.2. Techniques d'enregistrement des hologrammes

a) Déformation de la surface d'un liquide (réf. 12) (fig. 6)

L'objet à holographier est immergé dans un liquide ; une source (transducteur piézoélectrique) éclaire l'objet qui diffracte, réfléchit les ondes vers la surface du liquide (onde objet).

FIG. 6 .



DEFORMATION DE LA SURFACE D'UN LIQUIDE .

Une autre source, qui se trouve elle aussi à l'intérieur du liquide, éclaire directement la surface de celui-ci (onde de référence). Ces deux ondes (objet - référence) vont interférer à la surface du liquide, ce qui donnera naissance à des rides stationnaires. Cette surface constitue l'hologramme.

b) Balayage mécanique (Réf. 13) (fig. 7)

On utilise un transducteur qui balaie sous la surface du liquide et qui transforme le signal acoustique en un signal électrique, ce signal module l'intensité d'une lampe à tungstène dont on filmiera cette variation d'intensité (le film constituera l'hologramme).

Parfois on module le spot d'un oscilloscope avec le signal, une photographie de l'écran constituera l'hologramme.

c) Balayage électronique (réf. 14, 15).

L'hologramme est projeté sur une surface piézoélectrique, dont le champ acoustique va modifier la charge de la surface piézoélectrique et le nombre d'électrons secondaires produit par un faisceau électronique de balayage. Ce signal de sortie est utilisé pour moduler un faisceau électronique synchrone d'un tube cathodique.

La même technique est utilisée, mais le faisceau de balayage est produit par un laser (réf. 16).

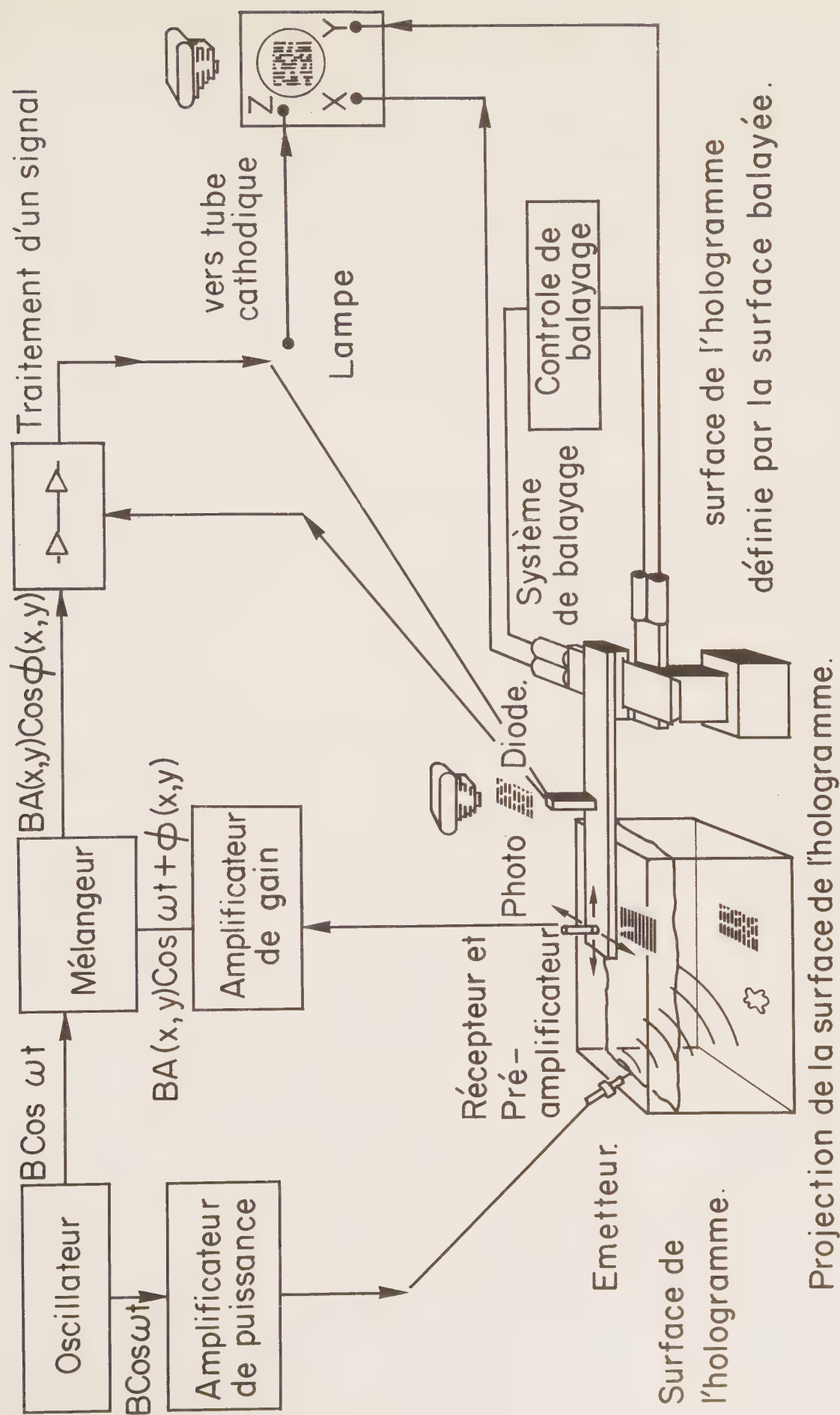
d) La référence. On utilise un transducteur pour la créer ce qui est comparable aux techniques de l'holographie optique.

On peut la simuler électroniquement (réf. 17). Ceci est possible car en acoustique on peut mesurer indépendamment l'amplitude et la phase d'une onde.

On peut ne pas l'ajouter (référence temporelle) (réf. 18).

Une bibliographie sur l'holographie acoustique a été faite à l'I. F. P. par A. BERTRAND.

e) Restitution : elle se fait de la même façon qu'en holographie optique. Lecture de l'hologramme avec une lumière cohérente (laser). La position des images et leurs distorsions seront données par les équations (19), (20), (21), (22), (23).



BALAYAGE CLASSIQUE.

III.3. Le balayage simultané (Réf. 19, 20) (fig. 8)

Cette nouvelle technique de balayage n'a pas d'équivalent, ni en holographie optique, ni en holographie acoustique classique.

Rappelons qu'en balayage classique l'émetteur est fixe et c'est le récepteur qui est mobile et balaie la surface commune aux deux faisceaux d'onde (objet - référence) (cas où l'onde de référence est créée par un transducteur) ou surface sur laquelle se projette le champ objet (référence simulée).

Le balayage simultané

L'émetteur et le récepteur sont tous les deux mobiles et balayent soit la même surface, soit des surfaces différentes. Ces surfaces peuvent avoir n'importe quelle forme et de plus, l'émetteur et le récepteur peuvent avoir des vitesses égales ou différentes. Ces vitesses peuvent être différentes dans les deux sens de balayage.

L'image se trouve rapprochée en fonction du rapport $P = \frac{V_e}{V_r}$

Comme on le verra plus loin, la résolution dépend toujours du rapport (P) donc du choix des vitesses. Il n'y a aucune contrainte en ce qui concerne les vitesses d'où gain de temps sur l'holographie classique (réf. 20).

Comme il y a réciprocité entre émetteur et récepteur dans le balayage classique, il y a réciprocité entre le bloc (Emetteur-Récepteur) et l'objet en holographie simultanée (réf. 21).

a) Formules de conjugaison (Réf. 22) (fig. 9)

m = hologramme réduit/hologramme sonique

λ_c = longueur d'onde de restitution

λ_o = longueur d'onde d'enregistrement

R_o = distance de l'objet à la surface balayée par le récepteur

R_r = distance de la source à l'hologramme à l'enregistrement

R_c = distance de la source à l'hologramme à la restitution

R_1 = distance de la surface balayée par la source à l'objet

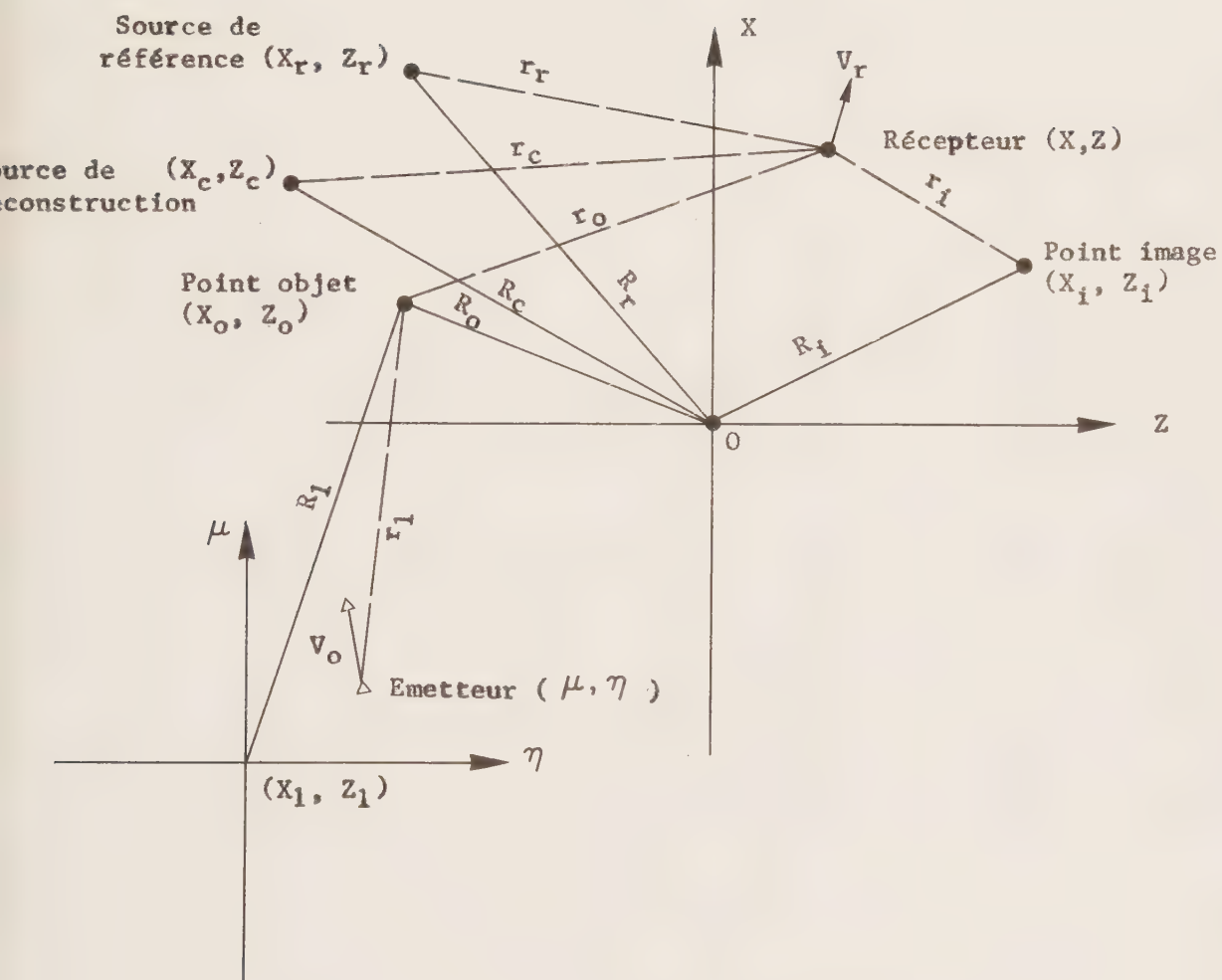


FIG. 9 - BALAYAGE SIMULTANE

R_{i-}^{+} = distance de l'image à l'hologramme

$$\mu = \frac{\lambda_c}{\lambda_o}$$

$$P = \frac{V_e}{V_r} = \frac{\text{vitesse émetteur}}{\text{vitesse récepteur}}$$

Nous aurons les relations suivantes :

$$\frac{1}{R_{i-}^{+}} = \frac{1}{R_c} \pm \frac{\mu}{m^2} \left[\frac{1}{R_o} + \frac{P^2}{R_l} - \frac{1}{R_r} \right] \quad (24)$$

$$\varphi_{i-}^{+} = \varphi_c \pm (\varphi_o + \varphi_l - \varphi_r)$$

b) Grandissement et grossissement

1. Grandissement axial

$$G_{A-}^{+} = \frac{d(R_{i-}^{+})}{dR_o} = \pm \frac{\mu}{m^2} \left[\frac{R_{i-}^{+}}{R_o} \right]^2 \left\{ 1 + P^2 \left(\frac{R_o}{R_l} \right) \left[1 - \frac{x_l x_o + y_l y_o + z_l z_o}{R_o^2} \right] \right\} \quad (25)$$

2. Grossissement angulaire

$$G_{a-}^{+} = \frac{d(\alpha_{i-}^{+})}{d\alpha_o} = \pm \frac{\mu}{m} \left(\frac{\sin \alpha_o}{\sin \alpha_{i-}^{+}} \right) \left\{ 1 + P \left(\frac{R_o}{R_l} \right) \left[1 - \frac{d_l(x_o + x_l)}{R_l^2} \cdot \frac{\sin(A_l + \alpha_l)}{\sin \alpha_l} \right] \right\} \quad (26)$$

d_l : distance entre plan émetteur et plan récepteur

$$\cos A_l = \frac{x_l}{d_l} \quad \cos \alpha_l = \frac{x_o}{R_o}$$

3. Grandissement transversal

$$G_{t-}^{+} = \pm \frac{R_{i-}^{+}}{R_o} G_{a-}^{+} \quad (27)$$

III.4. Dispositifs particuliers

a) Cas où l'émetteur et le récepteur coïncident à l'origine

$$R_o = R_1$$

$$\frac{1}{R_{i+}} = \frac{1}{R_c} + \frac{\mu}{m^2} \left[\frac{1 + P^2}{R_o} - \frac{1}{R_r} \right]$$

$$\varphi_{i+} = \varphi_{c+} + (2\varphi_o - \varphi_r)$$

$$G_{A+} = + \frac{\mu}{m^2} \left[\frac{R_{i+}}{R_o} \right]^2 \left[1 + P^2 \right]$$

$$G_{a+} = + \frac{\mu}{m^2} \left(\frac{\sin \alpha_o}{\sin \alpha_{i+}} \right) (1 + P)$$

$$G_{t+} = + \frac{R_{i+}}{R_o} \cdot G_{a+} = + \frac{R_{i+}}{R_o} \cdot \frac{\mu}{m^2} \cdot \frac{\sin \alpha_o}{\sin \alpha_{i+}} (1 + P)$$

Ce qui revient à écrire :

$$G_{A+} = + \frac{1}{\mu} \left[\frac{\sin \alpha_{i+}}{\sin \alpha_o} \right]^2 \left[\frac{1 + P^2}{(1 + P)^2} \right] \left[G_{t+} \right]^2$$

b) Cas où $R_r = R_c = \infty$ et $P = 1$ et $R_o = R_1$

$$\frac{1}{R_{i+}} = + \frac{\mu}{m^2} \frac{2}{R_o} \quad (27')$$

$$\varphi_{i+} = + 2\varphi_o \quad (28)$$

$$G_{A-}^{+} = \pm \frac{\mu}{m^2} \left[\frac{R_{i-}^{+}}{R_o} \right]^2 \cdot 2 = \pm \frac{m^2}{2\mu}$$

$$G_{a-}^{+} = \pm \frac{\mu}{m^2} \frac{\sin \alpha_o}{\sin \alpha_{i-}^{+}} \cdot 2$$

$$G_{t-}^{+} = \pm 2 \frac{\mu}{m^2} \cdot \frac{\sin \alpha_o}{\sin \alpha_{i-}^{+}} \frac{R_{i-}^{+}}{R_o} = \pm \frac{\sin \alpha_o}{\sin \alpha_{i-}^{+}}$$

III.5. Les aberrations proviennent des termes du 3e ordre (sphérique, coma, astigmatisme, courbure)

Elles sont plus ou moins importantes suivant le dispositif avec lequel on travaille.

III.6. La résolution

La résolution Δ dans le plan objet est le déplacement maximal du point objet avant que l'on passe d'un maximum à un minimum dans le plan de l'hologramme, durant l'enregistrement. Cette résolution est donnée par la relation :

$$\Delta = \frac{\lambda_o}{X_{\max} \left(\frac{1}{R_o} + \frac{P}{R_1} \right)} \quad (29)$$

$X_{\max}$: dimension de l'hologramme.

R_o : distance entre le plan de balayage récepteur et l'objet.

R_1 : distance entre le plan de balayage émetteur et l'objet.

a) Pour $R_o = R_1$ nous aurons :

$$\Delta = \frac{\lambda_o R_o}{X_{\max} (1 + P)}$$

b) Pour $R_0 = R_1$ et $P = 1$

$$\Delta = \frac{\lambda_0 R_0}{2 X_{\max}} \quad (30)$$

c) Pour $R_0 = R_1$ et $P = 0$: c'est le cas de l'holographie classique

$$\Delta = \frac{\lambda_0 R_0}{X_{\max}}$$

La résolution est 2 fois meilleure pour le cas $P = 1$

- Pour $P < 1$ le récepteur balaie une ouverture plus grande que celle de l'émetteur, ce qui fait que $X_{\max}$ est la limite de (X) .

- Pour $P > 1$ l'émetteur balaie une ouverture P fois plus grande que celle du récepteur d'où $X_{\max} = \left(\frac{X}{P}\right)$

La meilleure résolution est liée au rapport $P = 1$

III.7. Remarques (I). Si l'on fait une comparaison entre un hologramme obtenu avec un émetteur fixe et un récepteur mobile et un hologramme avec un récepteur mobile et un émetteur mobile (qui coïncident) (dans les mêmes conditions).

a) Nous voyons, en comparant les équations (23') et (28)

$$\varphi_{i-}^{+} = \varphi_0$$

$$\varphi_{i-}^{+} = 2 \varphi_0$$

que la phase a doublé, ce qui revient à dire que les fréquences spatiales ont doublé, de même pour la largeur de la bande spectrale.

b) en comparant les équations (23'') et (27')

$$\frac{1}{R_{i-}} = + \frac{u}{m^2} \cdot \frac{1}{R_o}$$

$$\frac{1}{R_{i-}} = + \frac{u}{m^2} \cdot \frac{2}{R_o}$$

Nous voyons que la distance image - hologramme a diminué de moitié.

c) en comparant les équations (23'') et (30)

$$\Delta = \frac{\lambda_o R_o}{X_{\max}}$$

$$\Delta = \frac{\lambda_o R_o}{2 X_{\max}}$$

Nous voyons que la résolution est deux fois meilleure.

III.8. Remarques (II)

a) La direction du faisceau incident est constante pour un mouvement de translation.

b) Le mouvement introduit un déphasage si le faisceau incident est incliné par rapport à l'axe de l'hologramme.

c) Ce déphasage peut être considéré comme une fonction linéaire du balayage dans le plan de l'ouverture et sa valeur dépend de l'angle d'inclinaison.

d) Le résultat donne un hologramme qui, à la restitution, produira une image déplacée latéralement, bien que l'objet soit réellement situé sur l'axe de l'ouverture de l'hologramme.

e) Le mouvement de l'émetteur ne doit en aucun cas être considéré comme remplaçant l'inclinaison de l'onde de référence.

f) Le récepteur peut être utilisé comme émetteur et réciproquement. De même, il existe une réciprocité entre le bloc (émetteur-récepteur) et l'objet.

g) Le balayage simultané utilise une source en continu et non pulsée.

h) La profondeur du champ est donnée par parallaxe (Réf. 23).

- "Cette partie est tirée de l'article de Hildebrand, Haines"
(Holographie by scanning, J.O.S.A. - Janvier 1969).

III.9. Propriétés des hologrammes acoustiques

Directivité d'un transducteur

C'est la propriété qu'a ce transducteur de répartir dans l'espace l'énergie qu'il échange avec le milieu.

à l'émission : est caractérisé par une fonction $I(\theta, \psi)$. θ et ψ sont les angles polaires de l'espace représentant l'intensité sonore dans la direction (θ, ψ) à une distance "R" de la source.

à la réception : est caractérisé par une fonction $G(\theta, \psi)$ représentant en fonction des angles polaires (θ, ψ) de la direction de l'onde incidente, la variation de la sensibilité du récepteur.

Généralement, on préfère avoir une fonction variant comme une intensité sonore comparable à $I(\theta, \psi)$; soit une fonction :

$$I'(\theta, \psi) = K \cdot G^2(\theta, \psi)$$

a) Directivité d'un émetteur circulaire (suivant une seule direction)
(Réf. 24)

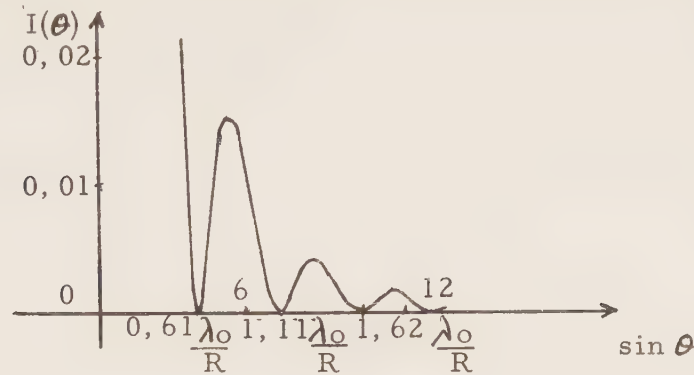
$$I(\theta) = \left\{ \frac{2 J_1 \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} \sin(\theta) \cdot R \right]}{\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \sin(\theta) \cdot R} \right\}^2$$

θ : angle d'incidence

R : rayon de l'émetteur

λ_0 : longueur d'onde dans le milieu de propagation

La fonction $I(\theta)$ a la représentation suivante : (fig. 10)



L'énergie maximum $I(\theta) = 1$ est envoyée sous l'incidence

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \sin(\theta) \cdot R = 0$$

soit pour $\sin \theta = 0$ $\theta = 0^\circ$

c'est-à-dire suivant la normale à l'émetteur c'est ce qui constitue le lobe central.

L'énergie est nulle $I(\theta) = 0$ pour tous les zéros de la fonction soit pour :

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \theta \cdot R = 3,83 \qquad \sin \theta = 0,61 \frac{\lambda_0}{R}$$

qui constitue le 1er lobe

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \theta \cdot R = 7,016 \qquad \sin \theta = 1,11 \frac{\lambda_0}{R}$$

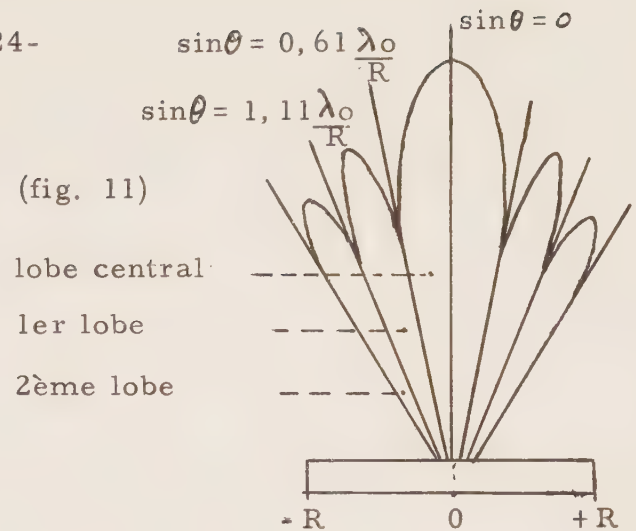
qui constitue le 2e lobe

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \theta \cdot R = 10,174 \qquad \sin \theta = 1,62 \frac{\lambda_0}{R}$$

qui constitue le 3e lobe

.....

d'où la représentation suivante : (fig. 11)



b) Récepteur circulaire

$$G(\theta) = \frac{2 J_1 \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \sin \theta \cdot R \right]}{\frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \theta \cdot R}$$

soit

$$I'(\theta) = K. \left\{ \frac{2 J_1 \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \theta \cdot R \right]}{\frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \theta \cdot R} \right\}^2$$

Incidence sous laquelle l'intensité sur le récepteur est maximum

$$I'(\theta) = 1 \Rightarrow \frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \theta \cdot R = 0 \Rightarrow \sin \theta = 0$$

L'intensité sur le récepteur est nulle $I'(\theta) = 0$ pour tous les zéros de la fonction soit pour :

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \theta \cdot R = 3,83 \quad \sin \theta = 0,61 \cdot \frac{\lambda_0}{R}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \theta \cdot R = 7,016 \quad \sin \theta = 1,11 \cdot \frac{\lambda_0}{R}$$

.....

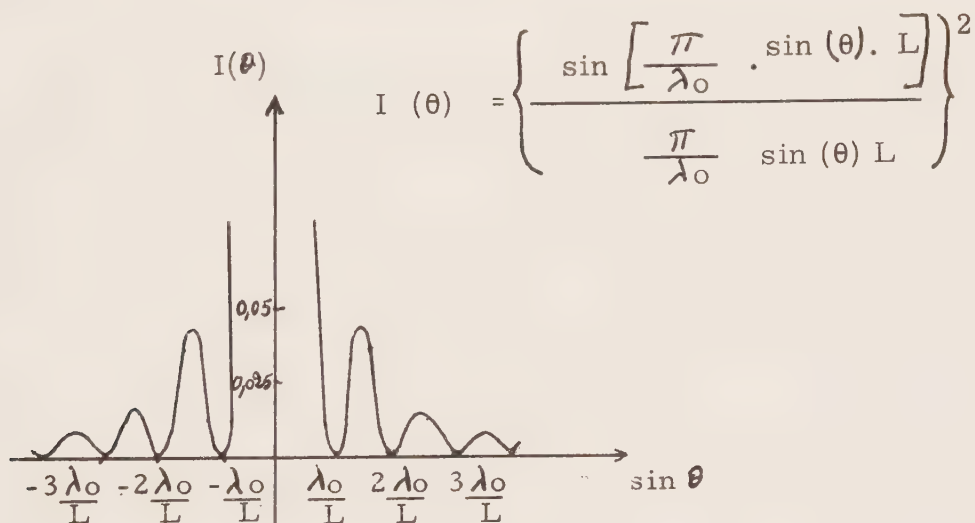
Généralement on considère le 1er zéro de la fonction et l'on définit cet angle d'incidence comme étant la résolution angulaire du récepteur soit :

$$\theta \neq 0,61 \cdot \frac{\lambda_0}{R}$$

Si l'angle est grand :

$$\sin \theta = 0,61 \frac{\lambda_0}{R}$$

Remarques : a) dans le cas où l'émetteur et le récepteur sont linéaires de longueur L, on aura la fonction de directivité sous forme de $[\text{sinc}]^2$ (fig. 12) avec :



Elle admet pour résolution angulaire :

$$\sin \theta = \frac{\lambda_0}{L}$$

b) Le même type de raisonnement peut être fait pour la direction ψ (26)

Dans le raisonnement que l'on a fait au sujet de la directivité des transducteurs, on a supposé que l'on pouvait prendre la transformée de Fourier des fonctions définissant les ouvertures de ces transducteurs, ce qui veut dire que l'on a supposé mesurer l'intensité à l'émission assez loin de l'émetteur, et que l'énergie récupérée provenait d'une zone assez loin aussi.

Dans le cas où cela se passe très près des transducteurs on prendrait la transformée de Fresnel.

c) Champ angulaire de vue

Soit un objet dont on veut faire l'hologramme, et supposons que cet objet soit assez loin du plan de réception de façon que la répartition des amplitudes dans le plan du récepteur soit représentée par la transformée de Fourier des amplitudes sur l'objet.

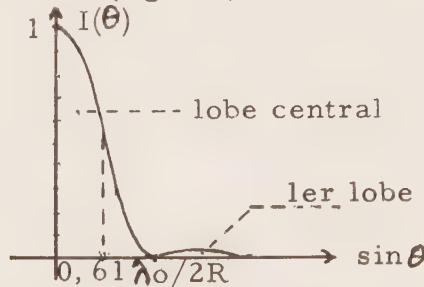
- Supposons que l'on échantillonne le plan du récepteur avec un récepteur circulaire de rayon "R" et tel que le pas d'échantillonnage soit égal à "2R", ce qui revient à écrire la transformée de Fourier de l'ouverture du récepteur.

$$G(\theta) = \frac{2 J_1 \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot R \cdot \sin \theta \right]}{\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot R \cdot \sin \theta}$$

Comme généralement en acoustique l'on préfère raisonner en intensité nous avons :

$$I(\theta) = |G(\theta)|^2 = \left\{ \frac{2 J_1 \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot R \cdot \sin \theta \right]}{\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot R \cdot \sin \theta} \right\}^2$$

Si l'on représente cette fonction : (fig. 13)



nous voyons que la plus grande fraction de l'énergie se trouve dans le lobe central, est définie par les bornes :

$$- \frac{0,61 \lambda_0}{2R} \leq \theta \leq + \frac{0,61 \lambda_0}{2R}$$

Soit :

$$\theta \neq \frac{0,61 \lambda_0}{2R} - \left(- \frac{0,61 \lambda_0}{2R} \right) = \frac{0,61 \lambda_0}{R.}$$

Si θ est grand et par raison de symétrie on peut écrire :

$$2 \sin \frac{\theta}{2} = \frac{0,61 \lambda_0}{R.}$$

- Dans le cas où l'échantillonnage est fait par un récepteur linéaire de longueur "L" le champ angulaire sera :

$$2 \sin \frac{\theta}{2} = \frac{\lambda_0}{L}$$

- En fait les équations précédentes ne sont autres que les réponses "fréquentielles" de ces types de récepteur et ce sont elles qui limitent le champ angulaire de vue.

Conclusion

a) Soit un hologramme de longueur X, échantillonné par un récepteur linéaire de longueur L et tel que le pas d'échantillonnage soit égal à L, on aura :

une résolution angulaire

$$\Delta \theta = \frac{\lambda_0}{X} ; \quad \sin \Delta \theta = \frac{\lambda_0}{X} \quad (\text{pour } \Delta \theta \text{ grand})$$

et un champ angulaire :

$$2 \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) = \frac{\lambda_0}{L}$$

b) Dans le cas d'un hologramme circulaire de rayon X échantillonné par un récepteur circulaire de rayon R avec un pas d'échantillonnage égal à 2 R, on aura :

résolution angulaire :

$$\Delta \theta = 0,61 \frac{\lambda_0}{X} \quad \text{ou} \quad \sin \theta = 0,61 \frac{\lambda_0}{X}$$

Champ angulaire de vue :

$$2 \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) = \frac{0,61 \lambda_0}{R}$$

c) Dans le cas où le pas d'échantillonnage Δy est supérieur à la dimension du récepteur, le champ angulaire sera :

$$2 \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) = \frac{\lambda_0}{\Delta y}$$

IV. APPLICATION DE L'HOLOGRAPHIE DANS LES SONDAGES

L'holographie permet comme nous l'avons vu précédemment, la restitution en 3 dimensions des objets ou des milieux que l'on a holographiés. Elle doit permettre de voir à l'intérieur de ces objets ou de ces milieux (en fonction de la profondeur du champ).

BUT : notre but est d'appliquer la technique holographique dans les sondages, pour cela on doit construire une sonde qui doit :

- a) permettre la visualisation en relief de la paroi du sondage,
- b) par suite de la transparence du milieu poreux permettre de voir les fractures et les fissures,
- c) de visualiser le ciment dans l'espace annulaire en puits tubé.

Expériences : vérifier sur une maquette de laboratoire la possibilité d'holographier un objet à l'aide d'une sonde.

- 1) Déterminer les conditions optimales de fréquence et de géométrie de la sonde.
- 2) Holographier un objet derrière un tubage.
- 3) Holographier un milieu poreux homogène et fracturé.
- 4) Construire un prototype.

IV. 1) Principe

Soit un émetteur pour éclairer les terrains qui entourent le puits, et un récepteur pour capter l'énergie provenant de toutes les régions éclairées (énergie réfléchie, réfractée, diffractée...)

Cette énergie captée constituera ce que nous avons appelé faisceau objet ou faisceau de sondage.

Un faisceau de référence sera ajouté électroniquement au faisceau de sondage dans un mélangeur.

Le signal de sortie du mélangeur sera envoyé à la surface pour moduler le spot d'un oscilloscope, sur lequel est monté une caméra qui filmiera la variation d'intensité du spot.

La position du spot sur l'oscilloscope est liée à la position du récepteur.
(Nous donnerons par la suite le schéma d'une sonde holodiagraphique type)

Après développement de la plaque photographique nous obtenons l'hologramme.

Une fois notre hologramme obtenu et réduit, nous l'éclairerons avec une lumière cohérente (laser) pour obtenir l'image à 3 dimensions des terrains qui entourent le puits.

IV. 2) Système holographique utilisé

Comme nous l'avons vu précédemment (technique d'enregistrement d'un hologramme acoustique) plusieurs possibilités s'offrent à nous, au point de vue balayage.

En continu

a) L'émetteur est fixe, et le récepteur balaie la surface sur laquelle se projette le "champ objet" appelé "balayage classique".

b) L'émetteur et le récepteur sont tous les deux mobiles et balayent la même surface (c'est-à-dire qu'ils ont la même vitesse de balayage dans les deux directions) qu'on a appelé "balayage simultané".

En impulsion

L'émetteur est fixe et le récepteur balaie la surface sur laquelle se projette le "champ objet".

Nous avons opté pour le système "balayage simultané" pour les raisons suivantes :

1. La résolution est meilleure

2. La quantité d'énergie à émettre est beaucoup plus petite que celle qu'on émettrait par le système "balayage classique".

3. La paroi entière est éclairée et non pas une partie seulement, ce qui aurait pu être le cas pour le balayage classique.

4. Les vitesses de l'émetteur et du récepteur sont indépendantes de tout paramètre, d'où la souplesse du système d'avoir une vitesse de balayage assez grande (dans la mesure où elle est très inférieure à la vitesse du son dans le milieu).

5. Il est plus facile de construire une sonde avec toute une partie mobile englobant l'émetteur et le récepteur, qu'une sonde avec une partie fixe "émetteur" et une partie mobile "récepteur".

IV. 3) Géométrie de la sonde (voir dessin)

Nous avons d'une part, une tête de sonde constituée par un cylindre en téflon de 70 mm de diamètre, qui en fait est constitué par deux moitiés de cylindre fixées sur un axe de 22 mm de diamètre.

Sur l'une des deux moitiés du cylindre sont encastrées les deux pastilles en titanate de baryum ; l'une servant d'émetteur et l'autre de récepteur. Cette moitié de cylindre a été travaillée de façon à donner aux pastilles une inclinaison de $\pm 15^\circ$ par rapport à la verticale (voir fig. 14).

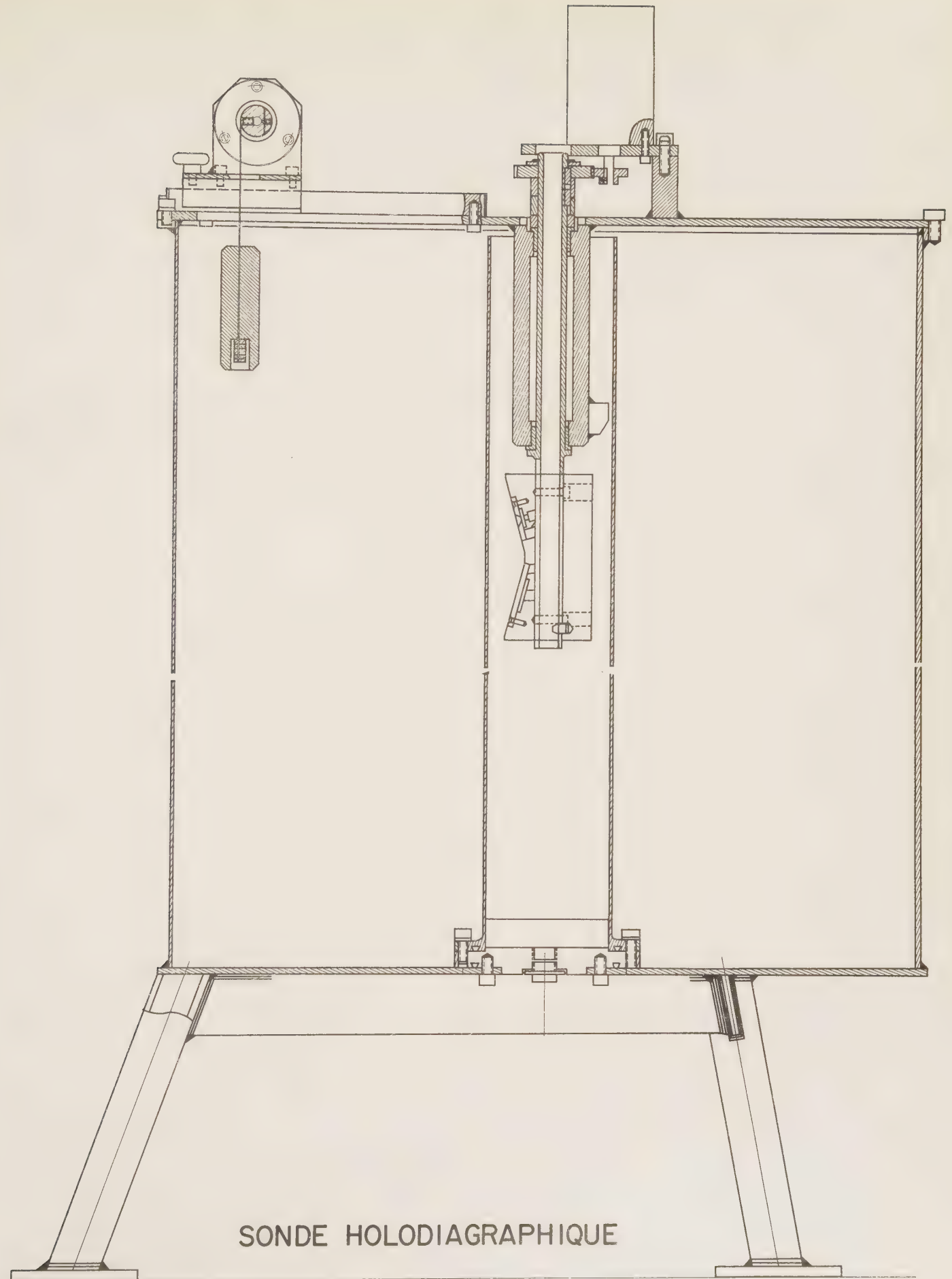
L'axe sur lequel est fixée la tête de sonde va sur une came (dont on décrira le rôle dans la partie balayage) qui est entraînée par un système de roue et pignon, par un moteur électrique "motoréducteur type 82.171, deux sens de rotation, vitesse 12 tours/minute, 24 volts, 50 HZ, (Crouzet) avec un système de réduction 1/2."

D'autre part, une autre partie qui concerne l'objet à holographier, Comme nous le verrons dans la partie balayage, nous avons simplifié le mouvement de la sonde et au lieu que la sonde balaie dans les deux directions, à savoir en rotation et verticalement, nous avons préféré donner le mouvement vertical à l'objet.

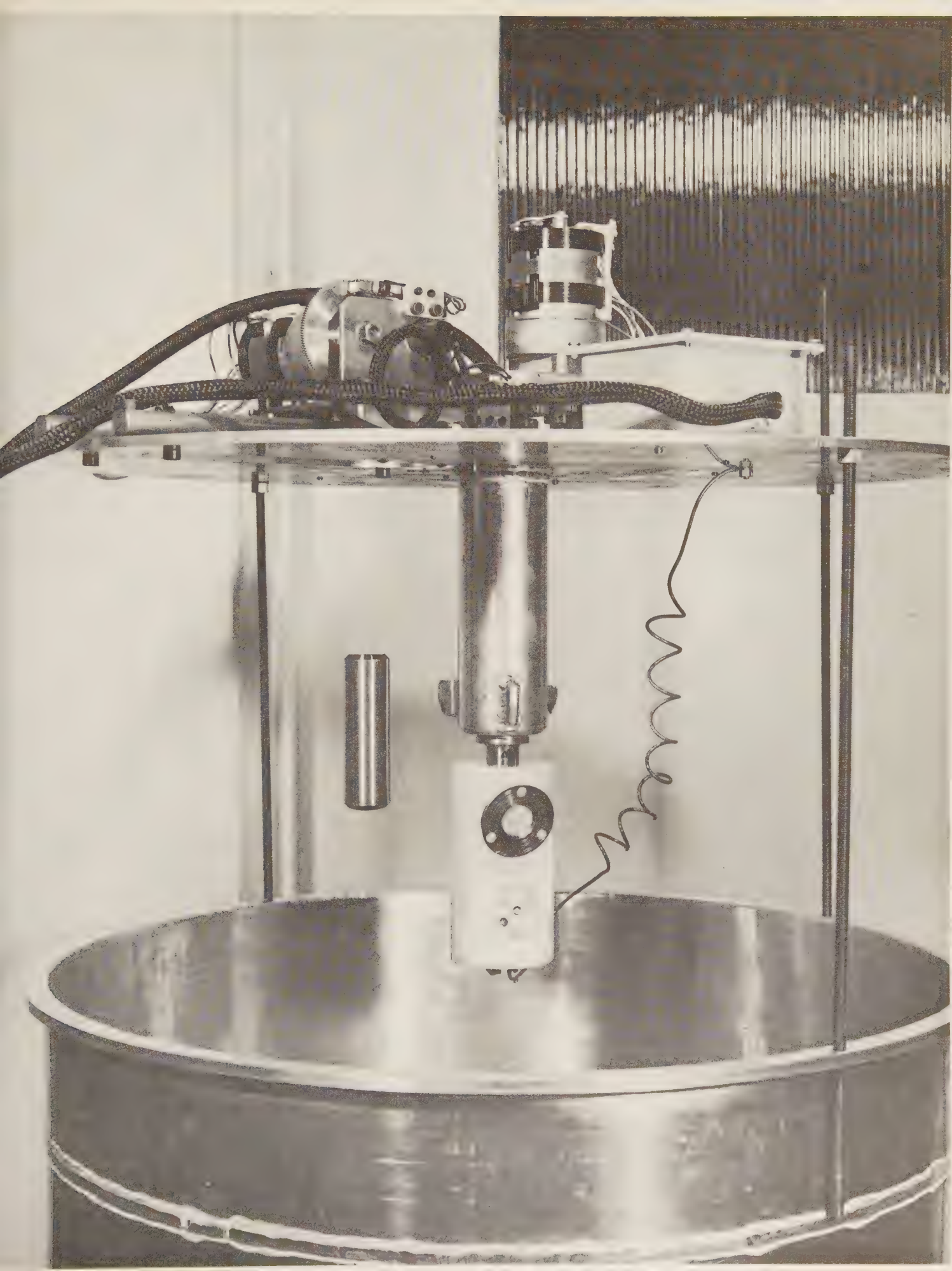
L'objet est maintenu par un fil en nylon , enroulé sur un tambour. Celui-ci est entraîné par un moteur électrique du même type que celui utilisé pour la rotation, mais dont la vitesse est de 1/12 tour/minute. Et enfin une cuve dans laquelle ont lieu les expériences. Cette cuve est en (AG 5), elle est cylindrique avec un diamètre de 600 mm et une hauteur de 600 mm , reposant sur trois pieds.

Le couvercle de la cuve sert de support aux moteurs et à la tête de sonde.

Sur le couvercle existe une fente graduée qui va du bord de la cuve à l'axe qui supporte la sonde, de façon à pouvoir positionner l'objet à différentes distances de la tête de sonde.



SONDE HOLODIAGRAPHIQUE





Pour que l'objet garde la même position à l'enregistrement et ne tourne pas autour de lui même, on a construit un système de guidage, constitué simplement par quatre fils attachés à un poids qui repose sur le fond de la cuve. Il suffit simplement de placer l'objet entre les fils qui vont deux à deux.

Les parois de la cuve ainsi que le fond sont recouverts de matériaux absorbant acoustiquement (polyuréthane).

IV. 4) Technique d'enregistrement d'un hologramme

A. Balayage mécanique

Ce système de balayage se compose de deux parties bien distinctes :

- d'une part le balayage horizontal ou mouvement de rotation de la sonde,
- d'autre part le balayage vertical ou mouvement de translation de la sonde.

A.1. Balayage horizontal (fig. 15)

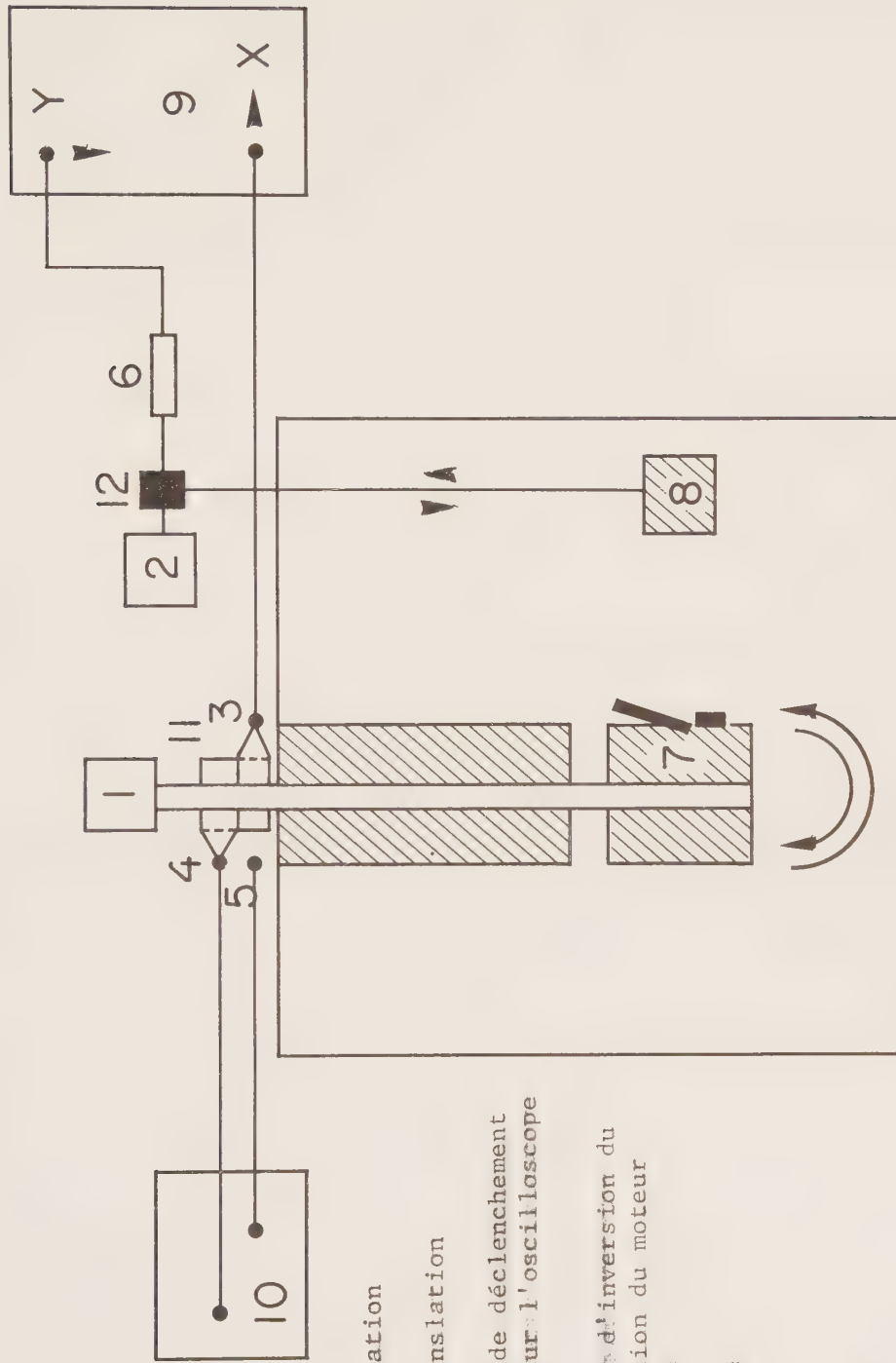
La rotation de la sonde s'effectue par l'intermédiaire d'un moteur (1) et d'une came double (11). Le moteur est à double sens de rotation. Une boîte de commande (10) permet la mise en marche en rotation de la sonde dans un sens ou dans l'autre. Les microcontacts (4) et (5) inversent le sens de rotation chaque fois que l'un des deux est déclenché. Le microcontact (3) déclenche le balayage horizontal sur l'oscilloscope (ce microcontact est relié directement à la base de temps de l'oscilloscope qui est réglée de façon à ce que le temps de balayage sur le cadran de l'oscilloscope soit égal au temps de balayage de la sonde.

A.2. Balayage vertical

Pour le mouvement de translation de la sonde, nous avons considéré la relation qui existe entre l'objet et le bloc émetteur-récepteur (7) à savoir que le résultat est le même, que l'on balaie avec l'objet fixe et la sonde mobile ou vice versa.

De ce fait, le mouvement vertical a été donné à l'objet.

La translation de l'objet (8) se fait par l'intermédiaire d'un treuil (12) qui est entraîné par un moteur (2).



- 1 Moteur de rotation
- 2 Moteur de translation
- 3 Microcontact de déclenchement du balayage sur l'oscilloscope
- 4 Microcontact d'inversion du sens de rotation du moteur potentiomètre
- 5
- 7 Tête de sonde
- 8 Objet
- 9 Oscilloscope
- 10 Boîte de commande
- 11 came
- 12 Treuil

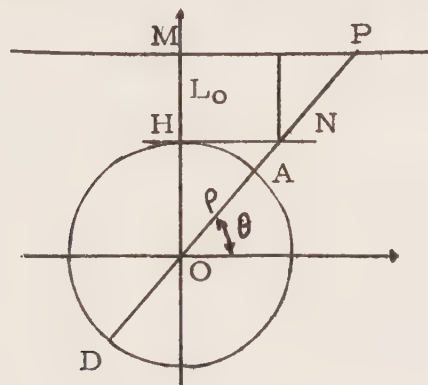
SCHEMA DU SYSTEME DE BALAYAGE.

Sur le treuil est monté un potentiomètre (6) qui est branché directement sur l'oscilloscope (balayage vertical) et toute variation du potentiomètre déplace le spot.

A.3. Vitesse de balayage

Nous avons démontré précédemment que ces vitesses étaient indépendantes de tout paramètre, mais à condition qu'elles soient très faibles par rapport à la vitesse du milieu, ce qui est le cas en général.

A.4. Déphasage introduit par le mouvement



Supposons l'objet défini par la droite qui passe par les points M, P. Quand le récepteur occupe la position H, le déphasage entre l'objet et le récepteur sera :

$$\Delta \varphi_H = \frac{2\pi}{\lambda_0} \overline{HM}$$

et à la position A le déphasage sera :

$$\Delta \varphi_A = \frac{2\pi}{\lambda_0} \overline{AP}$$

Posons $\overline{HM} = L_0$ d'où $\Delta \varphi_H = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot L_0$

Calcul de $\overline{AP}$

Nous avons $\overline{AP} = \overline{AN} + \overline{NP}$

Calcul de $\overline{AN}$ La puissance du point N par rapport au cercle (C)

$$\overline{NA} \cdot \overline{ND} = \overline{NH}^2$$

$$\overline{NA} [\overline{NA} + \overline{AD}] = \overline{NH}^2$$

$$\text{Posons } \overline{NA} = X \qquad \overline{AD} = 2\rho \qquad \overline{NH} = \rho \cotg \theta$$

$$X^2 + 2\rho X - \rho^2 \cotg^2 \theta = 0$$

d'où les solutions

$$X' = -\rho + \rho \left[1 + \cotg^2 \theta \right]^{1/2} = -\rho \left[1 - \frac{1}{\sin \theta} \right]$$

$$X'' = -\rho - \rho \left[1 + \cotg^2 \theta \right]^{1/2} = -\rho \left[1 + \frac{1}{\sin \theta} \right]$$

Seule la 1ère solution a un sens physique

Calcul de $\overline{NP}$

$$\overline{NP} = \frac{L_0}{\sin \theta}$$

d'où

$$\overline{AP} = \overline{AN} + \overline{NP} = -\rho + \frac{\rho + L_0}{\sin \theta}$$

Le déphasage au point A sera :

$$\Delta \varphi_A = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[-\rho + \frac{\rho + L_0}{\sin \theta} \right]$$

Le déphasage entre les points M et P par rapport au récepteur sera

$$\Delta \varphi = \Delta \varphi_A - \Delta \varphi_H = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[-\rho - L_0 + \frac{\rho + L_0}{\sin \theta} \right]$$

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[(\rho + L_0) \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) \right]$$

$$\text{Posons } (\rho + L_0) = m = C^{\text{te}}$$

$$\text{et } \frac{2\pi}{\lambda_0} = k$$

$$\text{d'où } \Delta \varphi = k m \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right)$$

$$\frac{\Delta \varphi}{k} = m \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right)$$

La figure (15') représente la fonction

$$\frac{\Delta \varphi}{K} = \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) m \text{ l'unité étant "m"}$$

Comportement du déphasage

Nous avons : $\Delta \varphi = \frac{2 \pi}{\lambda_0} (\rho + L_0) \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right)$

On peut toujours poser : $(\rho + L_0) = n \lambda_0 = C^{\text{te}}$

d'où : $\Delta \varphi = 2 \pi n \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right)$

Le minimum de $\Delta \varphi$ est donné par :

$\Delta \varphi = 2 K \pi$ avec $K = 0, 1, 2 \dots$

d'où $2 \pi n \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) = 2 K \pi$

soit $\sin \theta = \frac{n}{n + K} = \frac{1}{1 + \left(\frac{K}{n} \right)}$

Le maximum de $\Delta \varphi$ est donné par

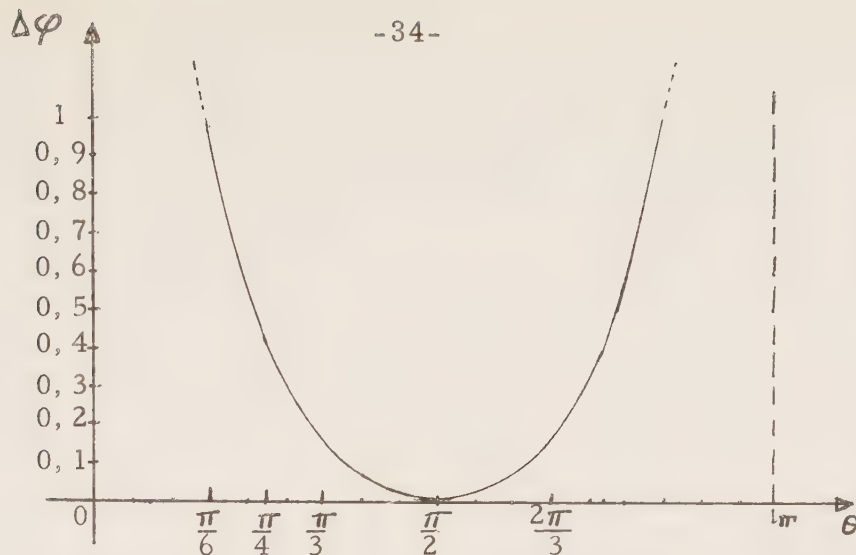
$\Delta \varphi = (2 K + 1) \pi$ d'où $2 \pi n \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) = (2 K + 1) \pi$

soit $\sin \theta = \frac{2 n}{2 n + 2 K + 1} = \frac{1}{\frac{1}{2 n} + \left(\frac{K}{n} \right) + 1}$

D'après les équations précédentes nous remarquons que pour "n" très grand le déphasage passe d'un minimum à un autre pour une petite variation de l'angle " θ ". Il en est de même d'un maximum à un autre, et pour "n" très petit le déphasage passe d'un minimum à un autre ou d'un maximum à un autre pour une grande variation de l'angle " θ ".

Ceci revient à dire que si l'objet est grand nous avons tout intérêt à travailler avec la condition "n" petit, et si l'objet est petit avec "n" grand.

Ce déphasage ne détériore la qualité de l'image que si l'on effectue une restitution avec un hologramme plan, mais si celle-ci est faite dans les mêmes conditions qu'à l'enregistrement, ce déphasage n'aura aucun effet sur l'image (comme nous le verrons plus loin "support d'hologramme").



B. Electronique (fig. 16)

B.1. Circuit d'émission

Il comprend un oscillateur (1) type 190 B Tektronix à amplitude constante qu'on fait fonctionner sur la fréquence de 1 MHz.

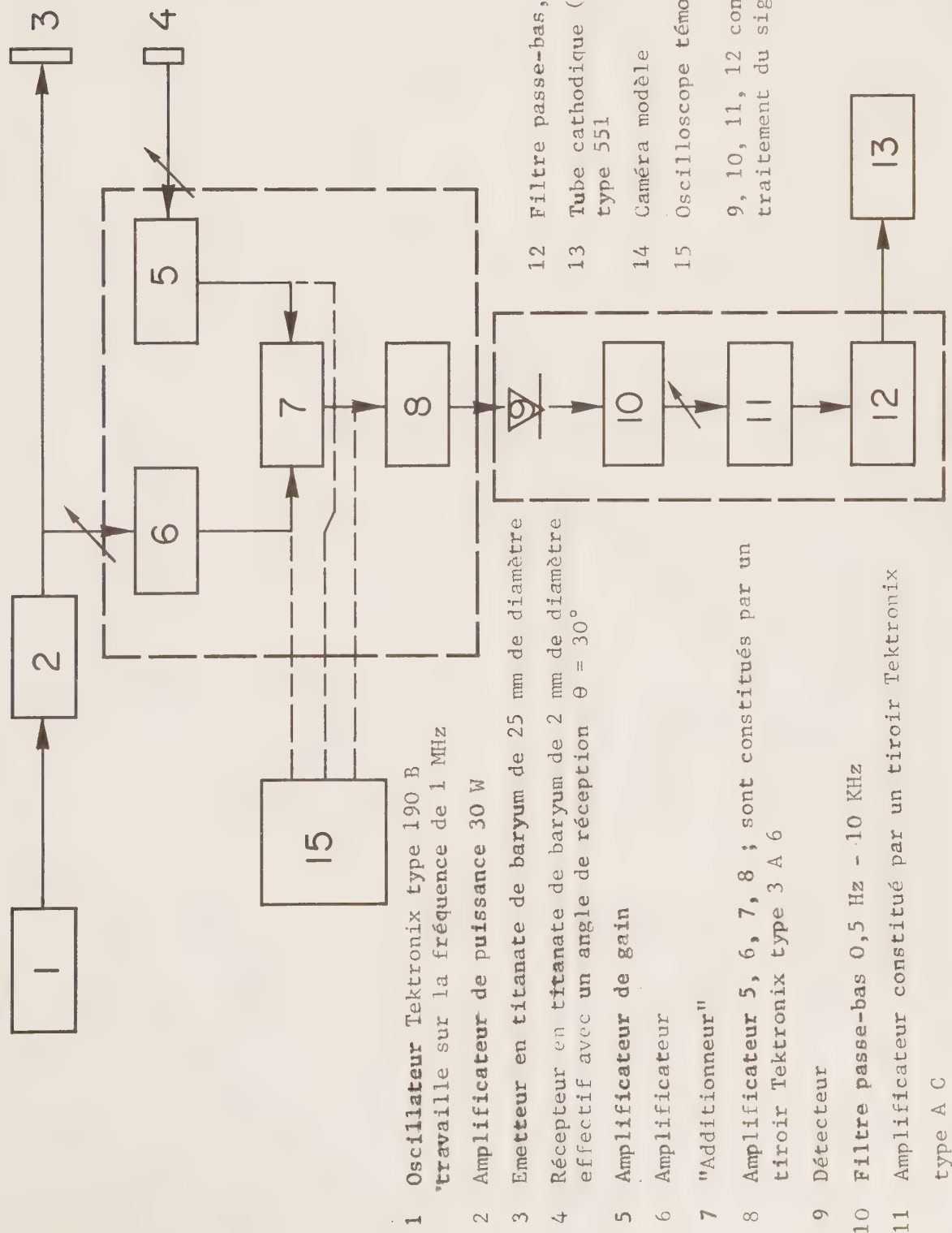
Le signal de sortie de l'oscillateur est amplifié par un amplificateur de puissance (2) (30 W) et attaque directement l'émetteur (3) qui est un disque de diamètre 25 mm et d'épaisseur 2,5 mm vibrant en épaisseur (en titanate de baryum), résonnant sur la fréquence de 1 MHz.

B.2. Circuit de réception

Il comprend un récepteur (4) qui est un disque en titanate de baryum de diamètre 6 mm (diamètre effectif égal à 2 mm) et d'épaisseur 2,5 mm vibrant en épaisseur et résonnant sur la fréquence de 1 MHz dont le signal est amplifié par un amplificateur de gain (5) et va directement sur un "additionneur" algébrique (7) en même temps qu'un signal de même fréquence provenant de l'amplificateur (2) et après avoir attaqué un autre amplificateur (6). Ces deux signaux sont additionnés (ce qui équivaut au phénomène d'interférence). Le signal de sortie de l'"additionneur" attaque un autre amplificateur (8). Il est détecté par une diode (9), filtré par un filtre passe-bas (10), amplifié de nouveau par un amplificateur (11) et refiltré aussi par le même type de filtre (12), ensuite ce signal module le spot d'un tube cathodique (13) sur lequel est montée une caméra (14) qui photographie le spot.

Remarques :

1. Les amplificateurs (5), (6), et (8) ainsi que l'"additionneur" sont constitués par un tiroir type (3A6) Tektronix monté sur un oscilloscope type (564) Tektronix qui nous sert de témoin pour voir nos signaux (référence, objet, addition).



SCHEMA DE L'ELECTRONIQUE:

2. Ces amplificateurs (5) et (6) sont des amplificateurs à gain variable et l'on peut effectuer les dosages que l'on veut, entre le signal de référence et le signal objet.

3. Les filtres ont une bande comprise entre 0,5 Hz et 10 KHz.

4. L'amplificateur (11) est constitué par un tiroir type (C.A.) Tektronix.

5. Le tube cathodique (13) est un oscilloscope type (551) Tektronix.

6. La caméra (14) type C.12

B.3. Etude du phénomène

Nous allons voir comment se comporte le phénomène d'après le dispositif électronique utilisé.

$$\text{soit } U_o(x, y) = E_o(x, y) \cos \left(\omega t + \varphi_o(x, y) \right)$$

Le signal capté par le récepteur (signal réfléchi, réfracté, diffracté par l'objet).

$$U_r = E_r \cos(\omega t) \text{ le signal pris sur l'oscillateur.}$$

Quand on additionne les signaux, à la sortie de notre "additionneur" on aura un signal :

$$\begin{aligned} U(x, y) &= U_o(x, y) + U_r \\ U(x, y) &= E_o(x, y) \cos \left[\omega t + \varphi_o(x, y) \right] + E_r \cos(\omega t) \\ &= E_o(x, y) \cos \varphi_o(x, y) - E_o(x, y) \sin(\omega t) \sin \varphi_o(x, y) \\ &\quad + E_r \cos(\omega t) \\ &= \cos(\omega t) \left[E_o(x, y) \cos \varphi_o(x, y) + E_r \right] \\ &\quad - \sin(\omega t) \left[E_o(x, y) \sin \varphi_o(x, y) \right] \end{aligned}$$

Posons :

$$E_o(x, y) \cos \varphi_o(x, y) + E_r = A$$

$$- E_o(x, y) \sin \varphi_o(x, y) = B$$

d'où

$$U(x, y) = A(x, y) \cos wt + B(x, y) \sin wt$$

qu'on peut mettre sous la forme :

$$U(x, y) = E(x, y) \cos [wt + \psi(x, y)]$$

avec :

$$E^2(x, y) = A^2 + B^2$$

$$E^2(x, y) = [E_o(x, y) \cos \varphi_o(x, y) + E_r]^2 + [-E_o(x, y) \sin \varphi_o(x, y)]^2$$

$$E^2(x, y) = E_o^2(x, y) + E_r^2 + 2 E_r E_o(x, y) \cos \varphi_o(x, y)$$

$$\text{et } \operatorname{tg} \psi = \frac{B}{A} = - \frac{E_o(x, y) \sin \varphi_o(x, y)}{E_o(x, y) \cos \varphi_o(x, y) + E_r}$$

d'où

$$U(x, y) = [E_o^2(x, y) + E_r^2 + 2 E_r E_o(x, y) \cos \varphi_o(x, y)]^{1/2}$$

$$\cos \left[wt - \operatorname{arctg} \frac{E_o(x, y) \sin \varphi_o(x, y)}{E_o(x, y) \cos \varphi_o(x, y) + E_r} \right]$$

En modulant le spot de l'oscilloscope on a :

$$U \cdot U^* = E_o^2(x, y) + E_r^2 + 2 E_r E_o(x, y) \cos \varphi_o(x, y)$$

Nous voyons d'après cette équation qu'à tout instant l'intensité du spot est fonction de l'amplitude et de la phase de l'objet.

B.4. Importance du signal de référence

Dans quelle proportion doit-on faire le mélange (référence - signal objet) ?

Supposons que $E_r \gg E_o$ ceci ne veut pas dire que l'intensité de l'hologramme s'appauvrit :

$$E = \left[E_r^2 + E_o^2 + 2 E_r E_o \cos \varphi_o \right]^{1/2}$$

soit :

$$E = E_r \left[1 + \left(\frac{|E_o|}{E_r} \right)^2 + \frac{2 |E_o|}{E_r} \cos \varphi_o \right]^{1/2}$$

Supposons que :

$$\left(\frac{|E_o|}{E_r} \right)^2 = 0,01 \quad \frac{|E_o|}{E_r} = 0,1$$

Le rapport d'intensité entre le maximum et le minimum des franges d'interférence est :

$$\left(\frac{E_r + |E_o|}{E_r - |E_o|} \right)^2 = \left(\frac{1 + 0,1}{1 - 0,1} \right)^2 = 1,5$$

qui avec un $\gamma = 2$, l'intensité relative transmise est :

$$(1,5)^\gamma = (1,5)^2 = 2,25 \text{ qui est un contraste énorme.}$$

Le contraste devient très faible, de l'ordre de quelques % pour

$$\left(\frac{|E_o|}{E_r} \right)^2 \leq 0,0001 \text{ c'est-à-dire c'est-à-dire pour un rapport } \frac{|E_o|}{E_r} \leq 0,01 \text{ \%}.$$

En conclusion, nous dirons qu'un mélange dans un rapport entre

$$\frac{1}{5} \text{ et } \frac{1}{10} \text{ sera assez bon.}$$

Remarque. Nous n'avons pas tenu compte de l'effet des appareils sur le signal, nous pensons que la distorsion que l'on peut avoir sur l'image doit être assez faible et ne dépassera pas 5 % (voir annexe)

Pour ceci, il suffit de comparer le signal à la réception ou à la sortie de l'amplificateur (8) avec le signal sur le tube cathodique (13).

B.5. Analyse mathématique dans le cas de nos expériences.

Les surfaces balayées par l'émetteur et le récepteur sont des surfaces semi-cylindriques.

Supposons le cas le plus simple qui est en fait le cas que l'on a utilisé, où les deux surfaces sont confondues.

Définissons cette surface par rapport à un système d'axes (x, y, z) et en coordonnées cylindriques nous avons

$$x = \rho \cos \theta$$

$$y = \rho \sin \theta$$

$$z = z$$

Dans la partie déphasage dû au mouvement nous avons :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[(\rho + L_0) \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) \right]$$

Supposons que le récepteur soit incliné d'un angle " α " par rapport à l'axe "z", ceci nous introduit un déphasage

$$\Delta\varphi_\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot z \cdot \sin \alpha$$

En réalité ce n'est pas le récepteur qui est incliné mais c'est l'émetteur.

Dans ce cas particulier, l'onde reçue sur le récepteur sera :

$$U_0(\rho, \theta, z) = E_0(\rho, \theta, z) e^{-i\varphi_0(\rho, \theta, z)}$$

$$e^{-\frac{2\pi}{\lambda_0} i \left[(\rho + L_0) \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) - z \sin \alpha \right]} \quad \text{(déphasage entre l'émetteur et l'objet)}$$

$$e^{-\frac{2\pi}{\lambda_0} i \left[(\rho + L_0) \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) \right]} \quad \text{(déphasage entre l'objet et le récepteur)}$$

E_o ; représente l'amplitude d'un point objet

φ_o ; représente la phase d'un point objet

- L'onde de référence s'écrit :

$$U_r = E_r e^{-i\varphi_r}$$

Le phénomène d'interférence entre ces deux ondes enregistré sur l'hologramme nous donnera comme amplitude :

$$U(\rho, \theta, z) = U_o(\rho, \theta, z) + U_r$$

L'intensité d'un point de l'hologramme sera :

$$I(\rho, \theta, z) = U(\rho, \theta, z) \cdot U^*(\rho, \theta, z)$$

En remplaçant $U(\rho, \theta, z)$ par sa valeur nous avons :

$$I(\rho, \theta, z) = [U_o(\rho, \theta, z) + U_r] [U_o(\rho, \theta, z) + U_r]^*$$

De même, en remplaçant U_o et U_r par leur valeur nous avons :

$$I(\rho, \theta, z) = E_o^2(\rho, \theta, z) + E_r^2 + 2E_r E_o(\rho, \theta, z)$$

$$\cos \left\{ \varphi_o(\rho, \theta, z) + \frac{4\pi}{\lambda_o} \left[(\rho + L_o) \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) - \frac{z \sin \alpha}{2} \right] - \varphi_r \right\}$$

Soit : $U_c = E_c e^{-i\varphi_c}$ l'onde de restitution.

Nous avons l'équation finale qui reconstruit le front d'onde

$$\begin{aligned} U_i &= E_c e^{-i\varphi_c} \left[E_o^2(\rho, \theta, z) + E_r^2 \right] \\ &+ E_c E_r e^{i(\varphi_r - \varphi_c)} E_o e^{-i \left\{ \varphi_o + \frac{4\pi}{\lambda_o} \left[(\rho + L_o) \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) - \frac{z \sin \alpha}{2} \right] \right\}} \\ &+ E_c E_r e^{-i(\varphi_r + \varphi_c)} E_o e^{i \left\{ \varphi_o + \frac{4\pi}{\lambda_o} \left[(\rho + L_o) \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) - \frac{z \sin \alpha}{2} \right] \right\}} \end{aligned}$$

- Explication de l'équation

Le premier terme représente pratiquement l'onde incidente, c'est une constante.

Le deuxième terme représente l'image réelle au facteur près :

$$E_c \cdot E_r e^{i(\varphi_r - \varphi_c)}$$

Le troisième terme représente l'image conjuguée par rapport à l'image réelle.

Remarques. Les termes qui reconstruisent le front d'onde original

$$E_o e^{-i \left\{ \varphi_o + \frac{4\pi}{\lambda_o} \left[(\rho + L_o) \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) - \frac{z \sin \alpha}{2} \right] \right\}} \text{ pour l'image réelle}$$

$$\text{et } E_o e^{i \left\{ \varphi_o + \frac{4\pi}{\lambda_o} \left[(\rho + L_o) \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) - \frac{z \sin \alpha}{2} \right] \right\}} \text{ pour l'image virtuelle}$$

seront affectés par les deux déphasages introduits par le mouvement et l'inclinaison de l'un des transducteurs.

Le déphasage introduit par le mouvement va transformer toute ligne droite constituée par l'objet dans le plan horizontal en une courbe.

Quant au déphasage introduit par l'inclinaison de l'un des transducteurs va simplement déplacer les images latéralement dans la direction des " Z " (ce déplacement est fonction de l'angle d'inclinaison).

Pour palier à la déformation de l'image introduite par le déphasage du mouvement, il suffit lors de la restitution de replacer l'hologramme dans les mêmes conditions qu'occupait le récepteur à l'enregistrement, c'est-à-dire lui donner la même courbure, ou plus exactement la forme d'un demi-cylindre. Ceci sera fait, en tenant compte du facteur de réduction utilisé à savoir : supposons que le rayon du demi-cylindre décrit par le récepteur soit " ρ " et que le facteur de réduction soit " m ", il suffit de donner à l'hologramme la forme d'un demi-cylindre (car à l'enregistrement, le récepteur balaie sur un angle égal à π) dont le rayon " ρ_o " sera déterminé par :

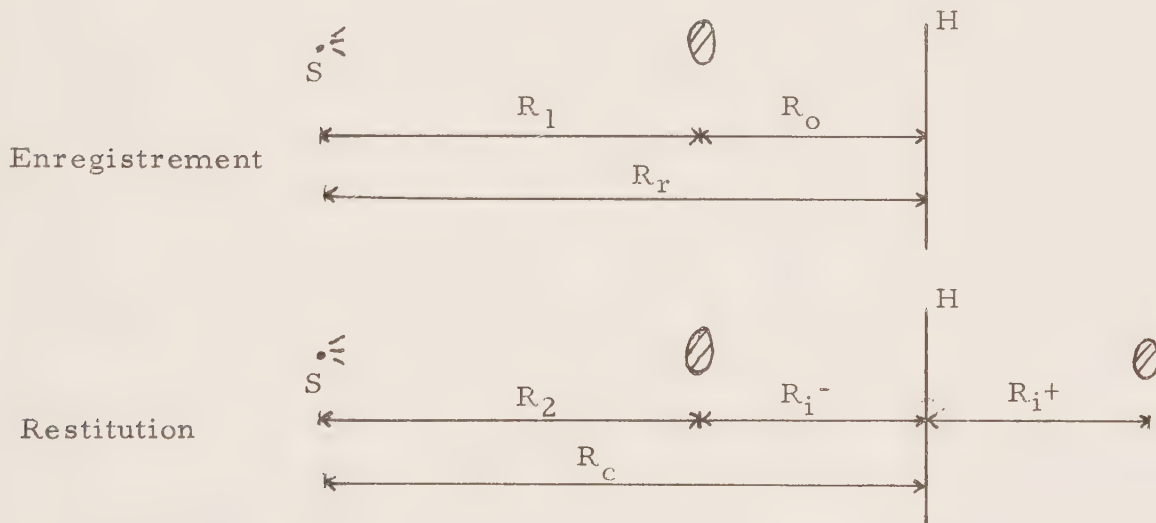
$$\rho_o = \frac{\rho}{m}$$

Nous avons construit un système qui peut donner à l'hologramme lors de la restitution différents rayons " ρ_o " suivant la réduction utilisée que l'on a appelé support de l'hologramme. Mais son utilisation s'est avérée très délicate à cause des dimensions de l'hologramme réduit (5 mm sur 10 mm maximum).

Toutefois, sans l'utilisation de ce support, nous avons cependant pu obtenir une restitution avec toutes les aberrations, distorsions, ainsi que l'effet d'un tel balayage.

IV. 5) Technique de restitution

Soit le dispositif suivant à l'enregistrement et à la restitution (les sources étant fixes).



A. 1) Formules utilisées pour le calcul des positions des images

Un hologramme est équivalent à une lentille, il admet une distance focale telle que :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} \quad (\text{en première approximation})$$

et à la restitution nous aurons les images qui seront données par : (formules classiques de l'optique géométrique).

$$\frac{1}{R_i^+} = \frac{1}{f} + \frac{1}{R_c}$$

$$\frac{1}{R_i^-} = - \frac{1}{f} + \frac{1}{R_c}$$

Supposons que l'on réduise l'hologramme par le facteur "m"

$$m = \frac{\text{hologramme réduit}}{\text{hologramme sonique}}$$

et que l'on fasse la lecture de l'hologramme avec une longueur d'onde λ_c différente de celle de l'enregistrement λ_o et posons :

$$\mu = \frac{\lambda_c}{\lambda_o} \quad \text{nous aurons une nouvelle distance focale de l'hologramme.}$$

$$f' = f \frac{m^2}{\mu}$$

et l'image se trouve à une distance $R_{i\pm}'$ tel que

$$\frac{1}{R_{i\pm}'} = \pm \frac{1}{f'} + \frac{1}{R_c}$$

Cas du balayage simultané.

La distance focale de l'hologramme sera donnée par

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{R_o} + \frac{P^2}{R_l} - \frac{1}{R_r}$$

Si l'on réduit l'hologramme par le facteur "m" et que la lecture se fasse avec une longueur d'onde :

$$\lambda_c \neq \lambda_o \quad \text{avec} \quad \mu = \frac{\lambda_c}{\lambda_o}$$

nous aurons une nouvelle distance focale de l'hologramme telle que :

$$f' = f \cdot \frac{m^2}{\mu} \quad \text{soit} \quad \frac{1}{f'} = \frac{\mu}{m^2} \left(\frac{1}{R_o} + \frac{p^2}{R_l} - \frac{1}{R_r} \right)$$

et l'image se trouve à une distance de l'hologramme telle que :

$$\frac{1}{R'_{i-}} = - \frac{1}{f'} + \frac{1}{R_c}$$

$$\frac{1}{R'_{i+}} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{R_c}$$

Dans le cas où : $R_o = R_l$, $P = \frac{V_e}{V_r} = 1$, $R_r = \infty$; $R_c = \infty$

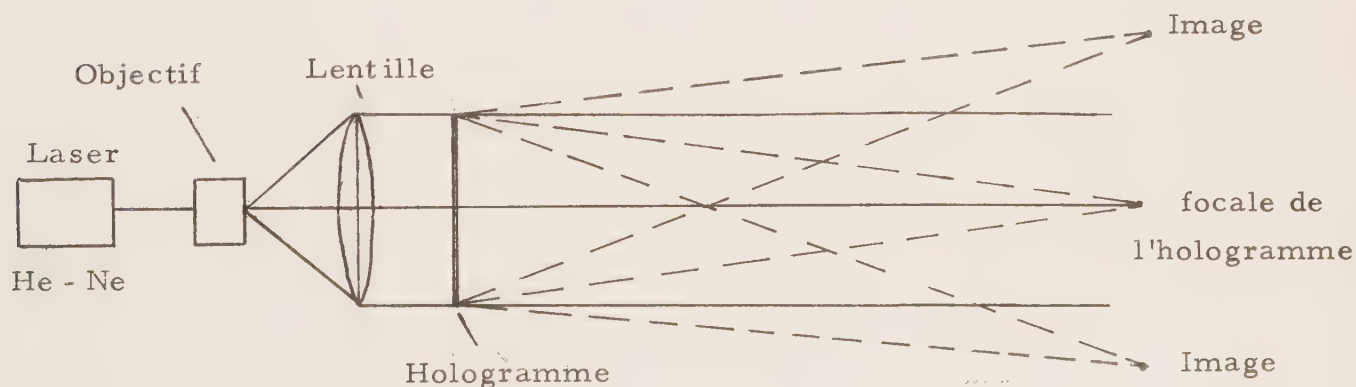
nous aurons :

$$f = \frac{R_o}{2} \quad , \quad f' = \frac{R_o}{2} \cdot \frac{m^2}{\mu}$$

et l'image : $R'_{i-} = -f'$

$$R'_{i+} = f'$$

A.2) Dispositif optique (fig. 17)



Le dispositif utilisé pour la restitution se compose d'un laser Hélium-néon de 1 milliwatt de puissance, et ayant une longueur d'onde de $6\,328\text{ \AA}$, d'un objectif qui nous donne un faisceau divergent et d'une lentille de 80 mm de distance focale. La lentille est réglée sur le banc optique, de façon à nous donner un faisceau de lumière parallèle.

L'hologramme est placé devant la lentille.

V. PARAMETRES EXPERIMENTAUX

V.1. Choix de la fréquence

Dans le souci d'avoir une longueur d'onde la plus proche possible de celle de la restitution, et d'avoir une profondeur de pénétration assez grande, nous avons opté pour la fréquence de 1 MHz.

V.2. Milieu dans lequel ont eu lieu nos expériences

C'est de l'huile dont la vitesse est $V_o = 1\,300\text{ m/s}$ ce qui nous donne une longueur d'onde :

$$\lambda_o = \frac{V_o}{F} \Rightarrow \lambda_o = 1,3\text{ mm}$$

V.3. Calcul des transducteurs

Emetteur : de forme circulaire "disque" vibrant en épaisseur, en titanate de baryum (T 51).

Epaisseur :

$$e = \frac{\lambda}{2} \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{V}{F}$$

V = vitesse dans le transducteur

$$V = 5\,000\text{ m/s}$$

$$F = 1\text{ MHz}$$

λ = longueur d'onde dans le transducteur

$$\text{soit : } \lambda = 5\text{ mm} \quad \text{et} \quad e = 2,5\text{ mm}$$

Diamètre : Le diamètre choisi a été

$$D_o = 25\text{ mm} \quad \text{ce qui représente une surface d'émission approximative de } 5\text{ cm}^2.$$

Récepteur de forme circulaire "disque" vibrant en épaisseur en titanate de baryum (T 51)

Epaisseur : $e = 2,5\text{ mm}$

Diamètre : Il est imposé par l'angle de réfraction totale entre le milieu et le transducteur soit :

$$\sin \beta = \frac{V_o}{V} \Rightarrow \sin \beta = 0,26 \Rightarrow \beta = 15^\circ$$

ceci revient à avoir un angle total de réception :

$$\theta = 2\beta = 30^\circ$$

soit un diamètre du récepteur qui approche la résolution linéaire d'après Rayleigh.

$$2 \sin \beta = \frac{\lambda_o}{d_o} \Rightarrow d_o = 2,5 \text{ mm}$$

nous avons pris un diamètre $d_o = 2 \text{ mm}$
(car en pratique l'angle est plus petit que la valeur théorique)

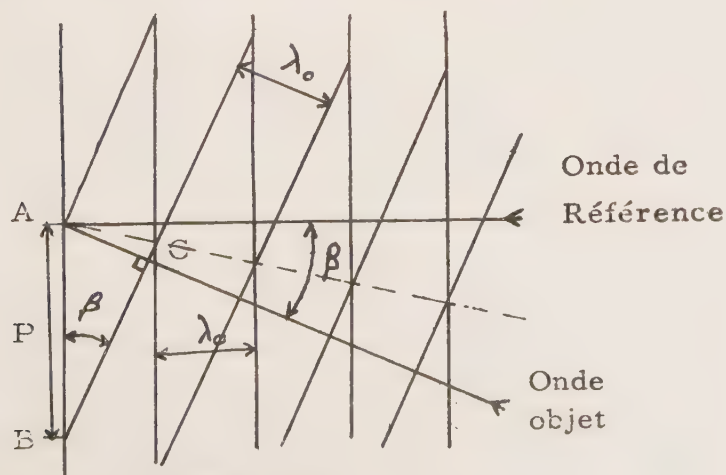
N.4. Période spatiale

L'onde objet arrive sur le récepteur sous un angle de 15° .

L'onde de référence est simulée électroniquement et est équivalente à une onde plane provenant de l'infini et parallèlement à l'hologramme, ce qui veut dire que ces deux ondes font entre elles un angle $\beta = 15^\circ$. D'après la figure (18) on voit que la période "p" sera :

$$p = \frac{\lambda_o}{\sin \beta} \Rightarrow p = 5 \text{ mm}$$

Supposons deux ondes planes de longueur d'onde λ_o et faisant entre elles un angle β . Elles donnent naissance en interférant à des franges parallèles et espacées de la distance p que l'on appelle période spatiale en considérant le triangle ACB.



$$\sin \beta = \frac{AC}{AB}$$

$$AC = \lambda_o$$

$$AB = p$$

$$\text{d'où } \sin \beta = \frac{\lambda_o}{p}$$

$$\text{soit } p = \frac{\lambda_o}{\sin \beta}$$

Fig. 18

V.5. La fréquence spatiale contenue dans l'hologramme sera :

$$\xi = \frac{1}{p} \Rightarrow \xi = 0,2 \text{ cycle/mm}$$

qui est en fait la réponse "fréquentielle" du récepteur.

V.6. Pas d'échantillonnage

D'après le théorème des fonctions à bande-limite, pour préserver une fréquence, il faut que le pas d'échantillonnage soit tel que :

$$\Delta y \leq \frac{1}{2\xi} \Rightarrow \Delta y \leq 2,5 \text{ mm}$$

ce pas d'échantillonnage est évalué par cycle de rotation

V.7. Balayage - vitesse de rotation

Les moteurs utilisés ont deux vitesses : 5 tr/mn, 12 tr/mn avec une réduction de 1/2.

Vitesse de translation

Moteur de $\frac{1}{12}$ tr/mn.

a) soit : moteur de rotation de 5 tr/mn avec la réduction $\frac{1}{2}$
et le moteur de translation de $\frac{1}{12}$ tr/mn

Supposons un enregistrement qui dure 48 minutes, puisque toutes les 24 secondes une ligne est balayée, le nombre total de lignes balayées sera donc :

$$n = \frac{48 \times 60}{24} = 120 \text{ lignes}$$

La longueur de l'hologramme sera pour une poulie de 12 mm de rayon :

$\ell = (12 \times 2 \times 3,14) \text{ mm}$ par tour du moteur de translation.

Pour un enregistrement de 48 minutes cette longueur sera :

$$X = \frac{48 \ell}{12} = 4\ell \quad X \neq 300 \text{ mm}$$

d'où le pas d'échantillonnage obtenu avec ces vitesses

$$\Delta y = \frac{300}{120} \quad \Delta y = 2,5 \text{ mm}$$

b) moteur de rotation de 12 tr/mn avec réduction $\frac{1}{2}$
et moteur de translation $\frac{1}{12}$ tr/mn

Pour 48 minutes d'enregistrement

$$n = \frac{48 \times 60}{10} = 288 \text{ lignes}$$

$$X \neq 300 \text{ mm}$$

$$\Delta y = \frac{300}{288} \quad \Delta y = 1,04 \text{ mm}$$

ceci revient à avoir approximativement 10 lignes/cm.

Remarques

- Le mélange signal de référence et signal objet est fait dans le rapport $\frac{1}{5}$. Ce dernier est commandé par les atténuateurs variables (voir schéma d'électronique).

- La stabilité du balayage est estimée à $\pm 10\%$ près.

- La stabilité de la partie électronique est estimée à 5 % près (voir comparaison des signaux annexe 1).

- Les calculs que l'on a fait précédemment concernent le cas où l'émetteur est fixe et le récepteur est mobile, mais comme nous travaillons en balayage simultané (Emetteur et Récepteur tous les deux mobiles) ceci revient à dire que :

a) le déphasage a doublé (c'est-à-dire que la fréquence spatiale a doublé)

b) que la période des franges a diminué de moitié (voir comparaison du balayage classique avec le balayage simultané traité précédemment).
D'où le tableau suivant :

Emetteur fixe, Récepteur mobile

$$\sin \beta = 0,26$$

$$P = 5 \text{ mm}$$

$$\overline{f} = 0,2 \text{ cycle/mm}$$

$$\Delta y \leq 2,5 \text{ mm}$$

Emetteur et Récepteur mobile

$$\sin \beta = 0,5$$

$$P = 2,5 \text{ mm}$$

$$\overline{f} = 0,4 \text{ cycle/mm}$$

$$\Delta y \leq 1,25 \text{ mm}$$

- Distance à l'enregistrement

Nos objets se trouvent à 20 cm de la surface de réception

- Résolution

Nous l'avons définie comme :

$$\Delta = \frac{\lambda_o R_o}{2 X} \quad \text{X étant la dimension de l'hologramme}$$

Etant donné que le type d'hologramme que l'on enregistre est celui de Fresnel, nous pourrions considérer approximativement que la dimension de l'hologramme est égale à celle de l'objet.

Pour un objet de 200 mm et situé à 200 mm de la surface de réception nous aurons : $\Delta = \frac{\lambda_o}{2} \neq 0,7 \text{ mm}$

Dans le cas du balayage classique, émetteur fixe, récepteur mobile, elle sera :

$$\Delta = \frac{\lambda_o R_o}{X}$$

et pour un objet de 200 mm situé à 200 mm de la surface de réception :

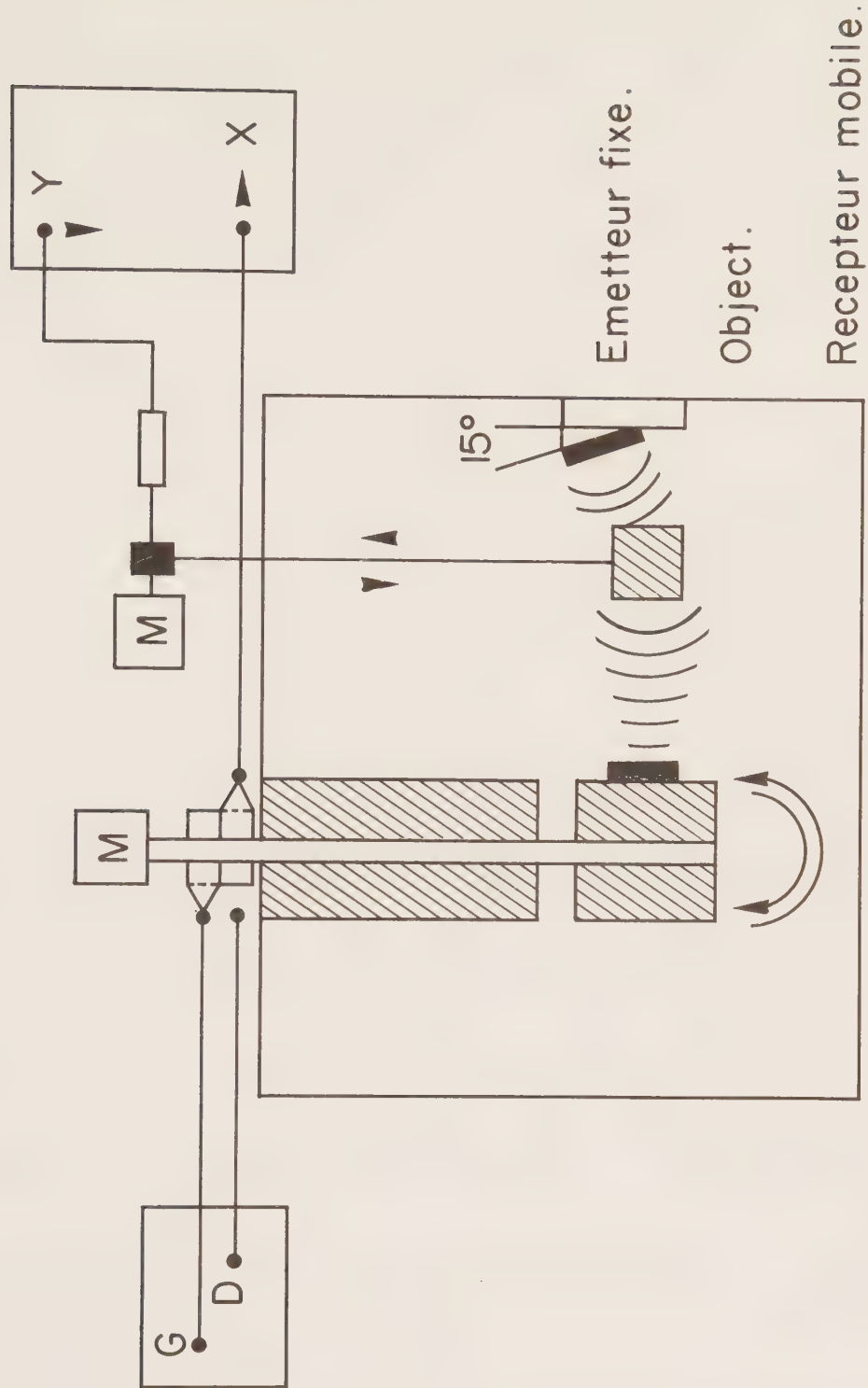
$$\Delta = \lambda_o \neq 1,3 \text{ mm}$$

VI. EXPERIENCES ET RESULTATS

Pour nos premières expériences, nous avons fait des essais avec le système de balayage classique, à savoir émetteur fixe et récepteur mobile (le récepteur balayait circulairement).

VI. 1. Système par transmission (fig. 19)

L'objet à holographier se trouve entre l'émetteur et le récepteur.



DISPOSITIF PAR TRANSMISSION .

A.1. Paramètres utilisés

F	= 1 MHz	: fréquence
λ_o	= 1,3 mm	: longueur d'onde dans l'huile
D_o	= 22 mm	: diamètre de l'émetteur
d_o	= 2 mm	: diamètre du récepteur
R_l	= 120 mm	: distance émetteur-objet
R_o	= 100 mm	: distance objet-récepteur
L	= $90 \lambda_o$	: dimension de l'objet
Δy	= 1 mm	# 10 lignes/cm : pas d'échantillonnage
$1/m_o$	= 2,5	$\frac{\text{longueur réelle balayée}}{\text{longueur de l'hologramme sur l'oscilloscope}}$
$m = m_o \cdot m_L$		: réduction totale.
$1/m_L$	= 10	$\frac{\text{longueur de l'hologramme sur l'oscilloscope}}{\text{longueur de l'hologramme optique}}$

Type de film utilisé à l'enregistrement : film polaroid 55 P/N.

Le traitement du signal à l'enregistrement est le même que celui décrit précédemment (voir partie électronique).

La référence est simulée électroniquement soit $R_r = \infty$

Le mélange signal objet-signal de référence est fait approximativement dans le rapport $\frac{1}{5}$

La restitution de l'hologramme est faite en lumière parallèle, soit : $R_c = \infty$

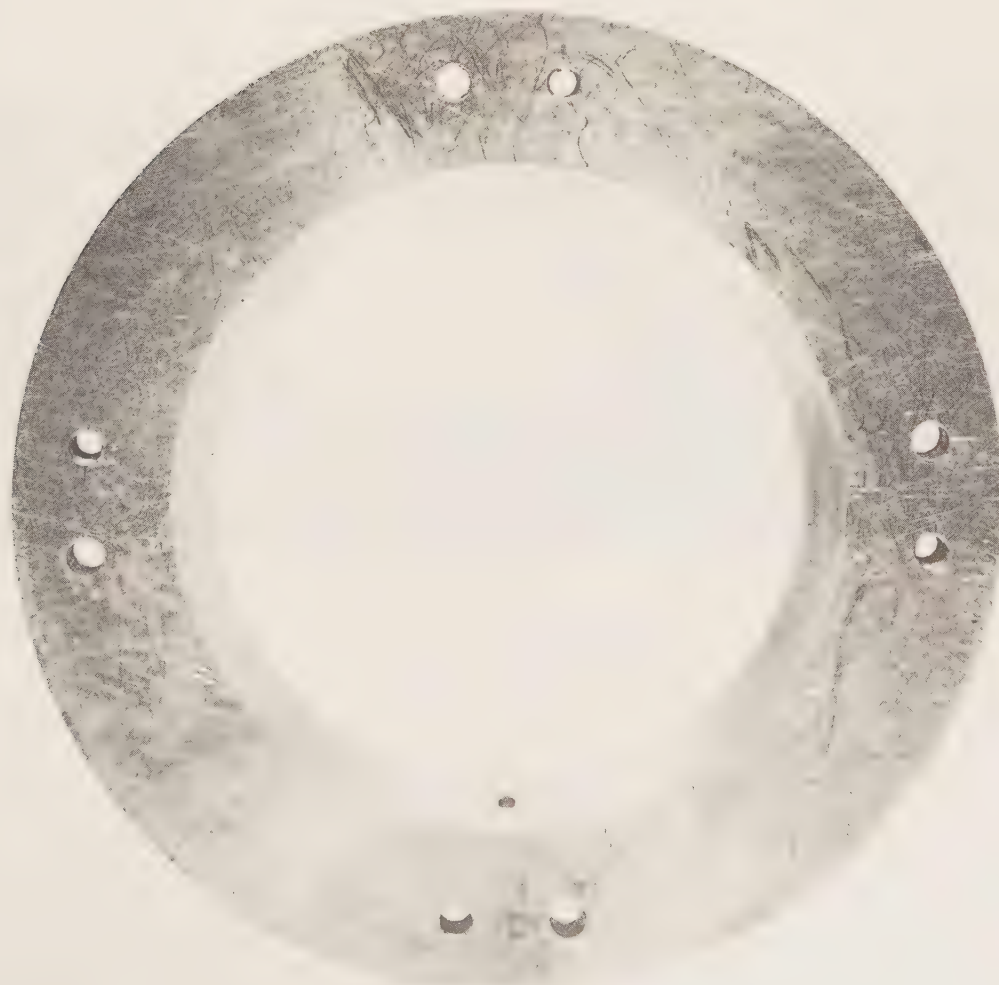
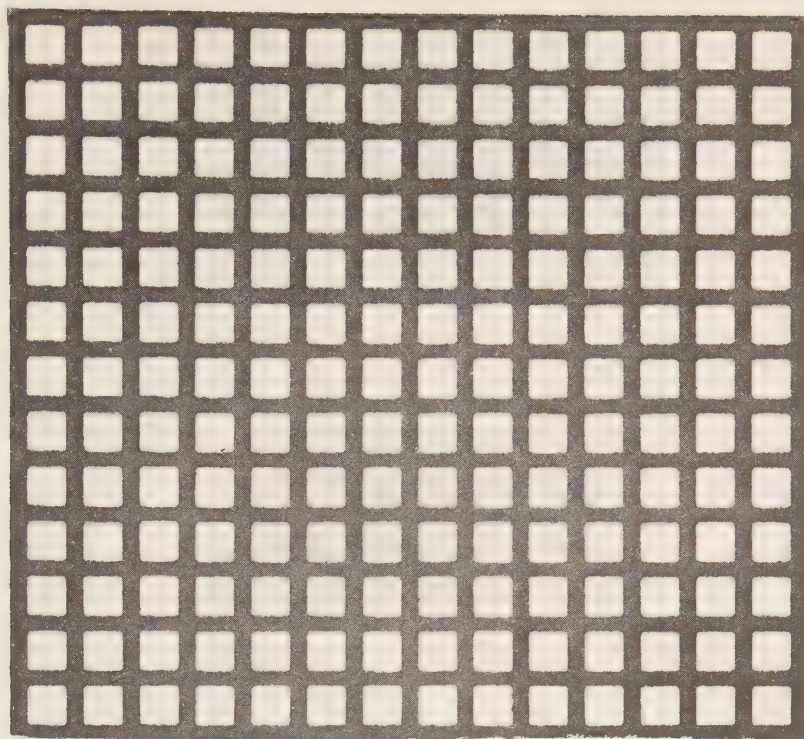
A.2. Résultats obtenus avec le type de dispositif.

Les objets holographiés sont :

a) une grille en aluminium de dimensions 100 mm x 110 mm et de 2 mm d'épaisseur. (fig. 20)

Ce genre de matériaux s'est avéré comme un bon réflecteur.

L'hologramme de cette grille montre assez bien d'une part, l'information provenant de l'objet (interférences assez nettes sous forme de demi-cercles), et d'autre part, un fond formé par des franges parallèles qu'on voit nettement sur la partie supérieure et inférieure de l'hologramme. (fig. 21).



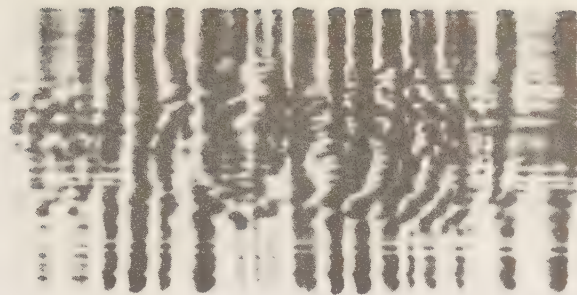


FIG.21 - Hologramme par transmission de l'objet fig. 20

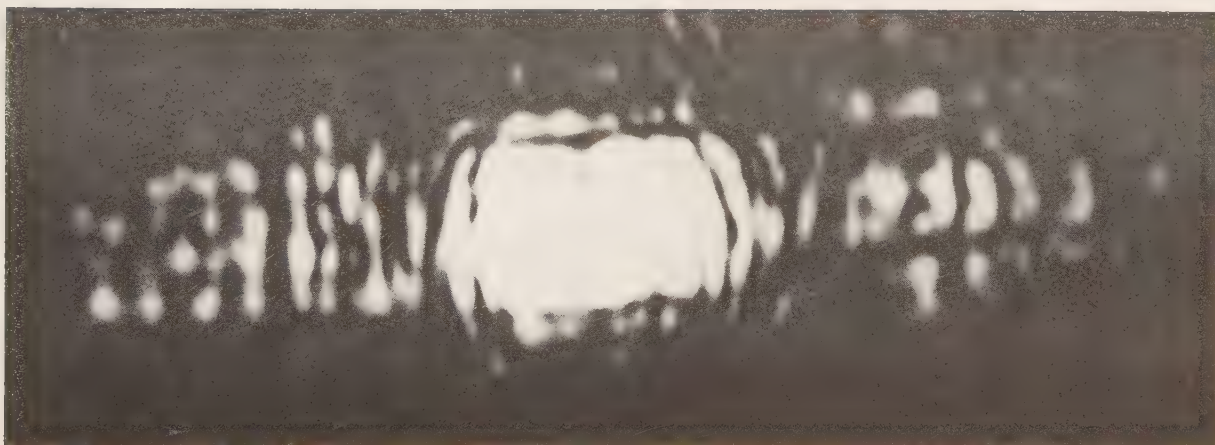


FIG.22 - Restitution

Ces interférences parallèles parasites sont dûes aux réflexions sur les parois de la cuve. Elles constituent un bruit de fond ; ce qui nous donne un rapport signal sur bruit assez faible. (bien que l'on ait couvert les parois de la cuve par un matériaux absorbant acoustiquement).

La fig. 22 montre la restitution de l'hologramme. Il ne nous a pas été possible de déterminer exactement la position de netteté de l'image (bien que celle-ci fut calculée en utilisant les formules classiques).

Les images se trouvent de part et d'autre de la tache centrale.

La partie restituée constitue le centre de la grille ; car à l'enregistrement l'émetteur étant directif, seule la partie centrale de la grille est "sonorisée".

b) Le deuxième objet est un morceau de roche (grés) de surface rectangulaire 140 mm x 100 mm et de 15 mm d'épaisseur avec 5 trous de 25 mm de diamètre chacun. (fig. 23).

L'hologramme de cet objet est donné par la fig. 24 , nous remarquons, comme pour l'hologramme précédent, toute une zone d'information avec un bruit de fond.

La figure 25 donne la restitution de l'hologramme.

c) Le troisième objet est le même type de roche, de même dimension, mais sans trous (fig.26).

L'hologramme (fig. 27) montre qu'il n'y a aucune information en son centre (ceci se comprend quand l'objet est entre l'émetteur et le récepteur, une très faible énergie traverse le morceau de roche et va sur le récepteur).

La restitution est donnée par la figure 28 .

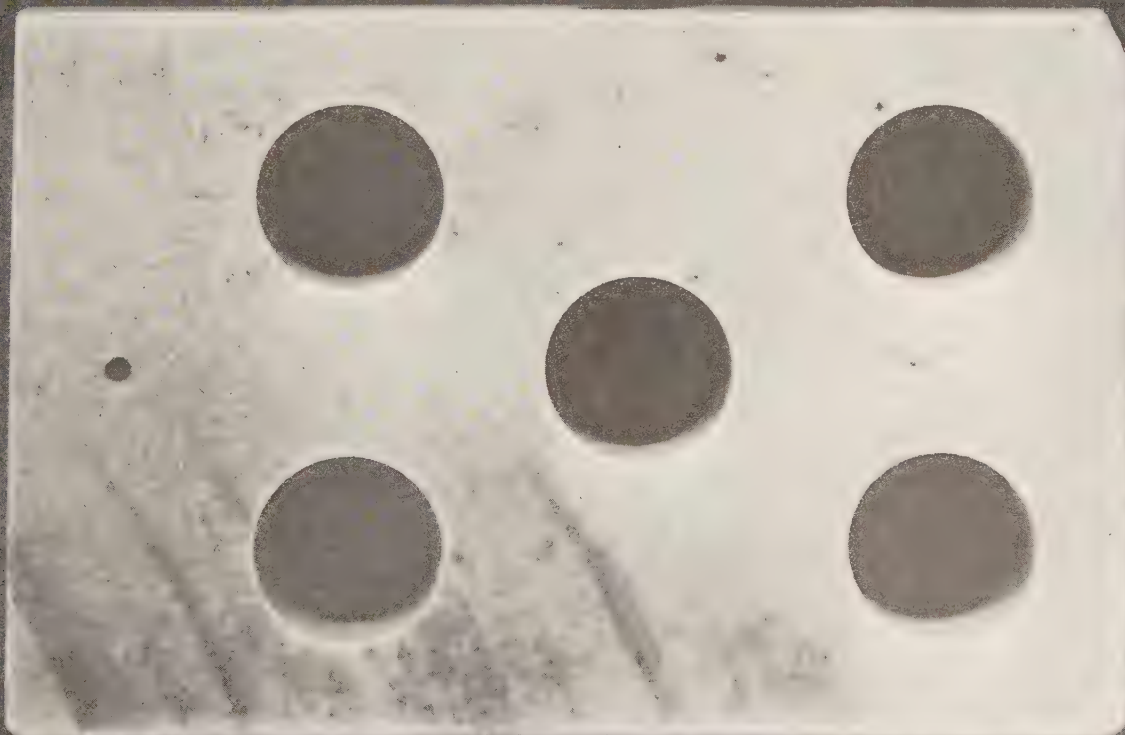
VI.2. Système par réflexion fig. 29

L'émetteur et le récepteur se trouvent dans le même espace par rapport à l'objet.

B.1. Paramètres utilisés

Les paramètres sont les mêmes que ceux du système par transmission, les distances émetteur-objet et récepteur-objet étant égales soit :

$$R_1 = R_o = 200 \text{ mm}$$



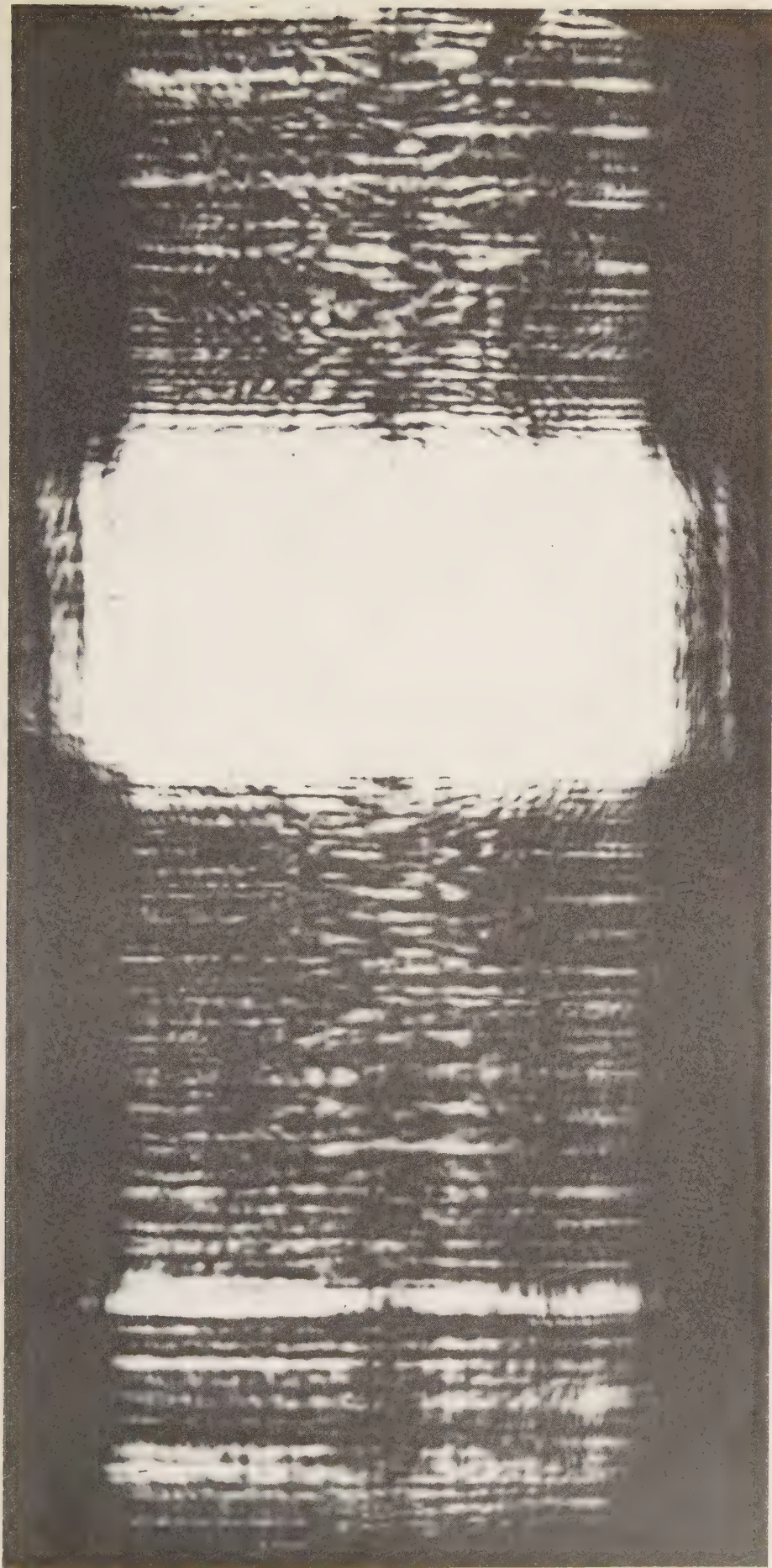


FIG. 25 - RESTITUTION

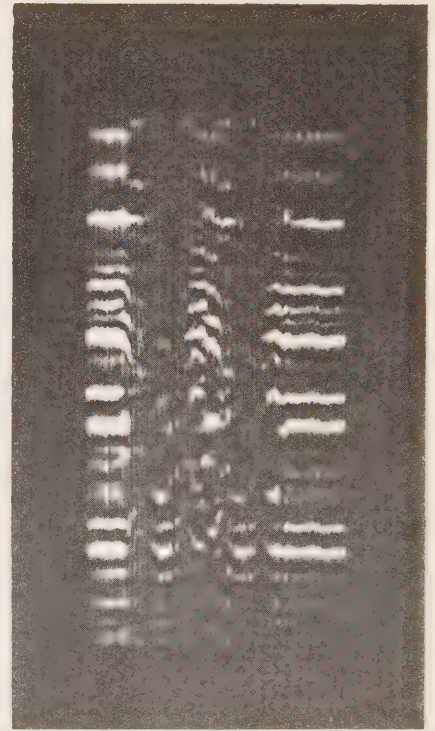


FIG. 24

Hologramme par transmission
de l'objet fig. 23



FIG. 28 - RESTITUTION

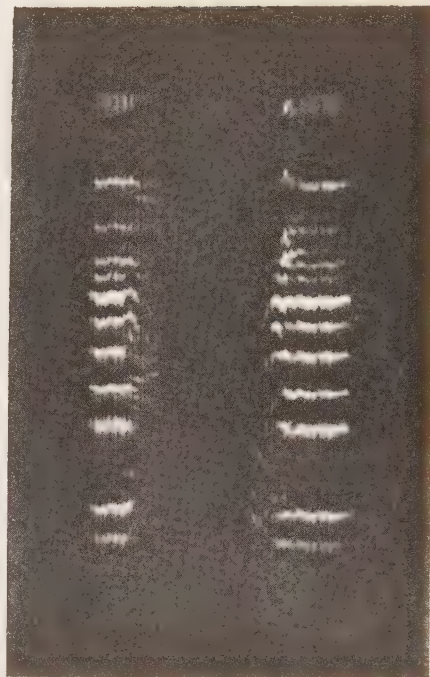


FIG. 27

Hologramme par transmission
de l'objet fig. 26

B.2. Résultats obtenus avec ce type de dispositif.

- a) grille "holographiée avec le système précédent". Son hologramme est donné par la fig. 30.
- b) morceau de grés avec 5 trous. L'hologramme est donné par la fig. 31
- c) morceau de grés sans trous.
L'hologramme est donné par la fig. 32
La restitution est donnée par la fig. 33

Remarques : Les dimensions des hologrammes correspondent à celles des hologrammes avec réduction oscilloscope $m_o = 1/2, 5$.

Le bruit de fond dû aux réflexions sur la paroi de la cuve existe pour ces deux systèmes.

VI.3 Système par balayage simultané

C.1. Paramètres utilisés

Ce sont les mêmes que ceux utilisés pour les systèmes précédents avec :

$$R_1 = R_o = 20 \text{ cm}$$

$$R_r = \infty$$

$$R_c = \infty$$

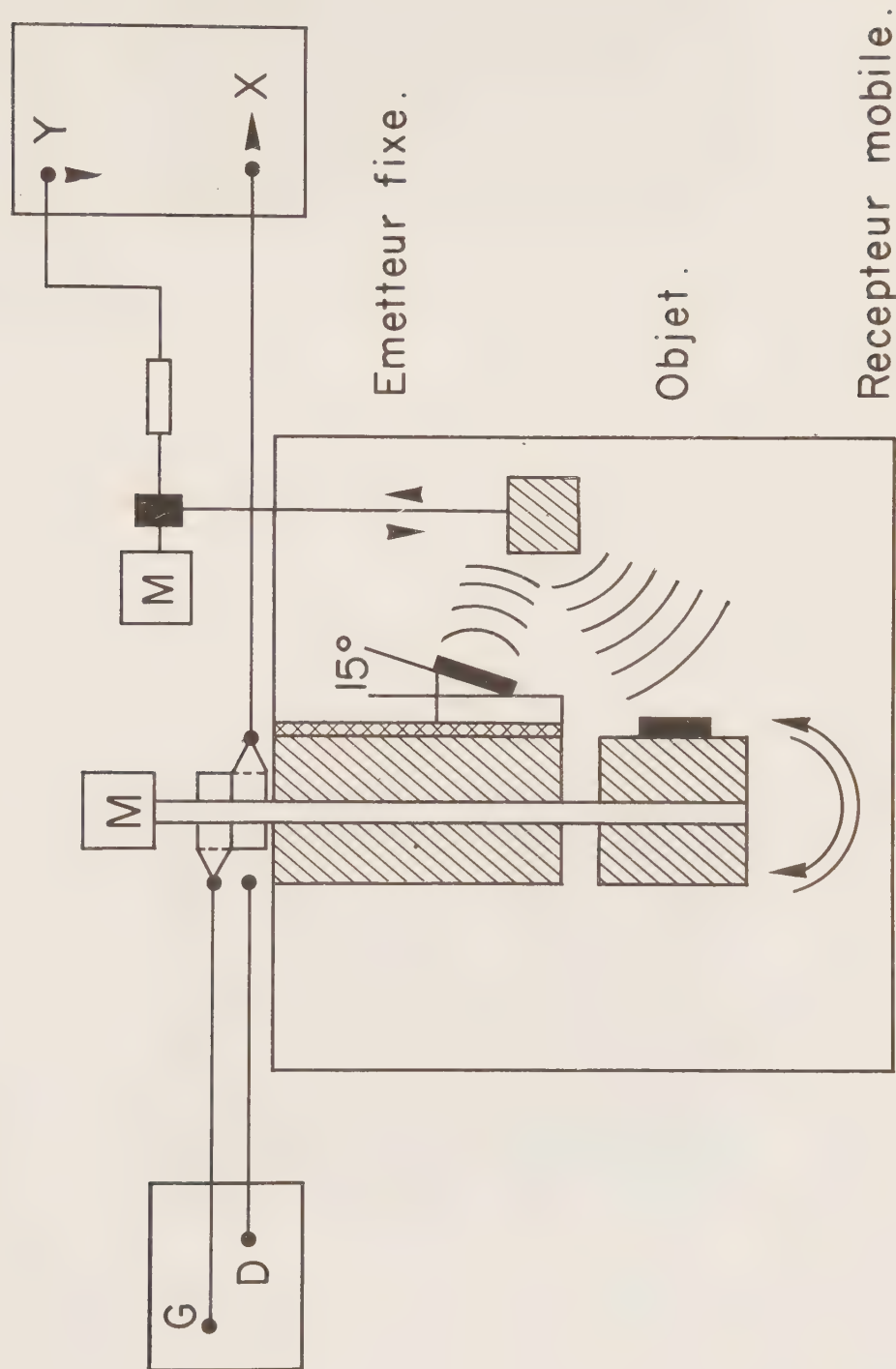
$$P = \frac{V_e}{V_r} = 1$$

C.2. Résultats.

- a) L'objet holographié est un anneau en aluminium de 140 mm de diamètre extérieur, 80 mm de diamètre intérieur et 5 mm d'épaisseur. (fig. 34)

L'hologramme de l'anneau avec ce type de dispositif est donné par la fig. 35.

FIG. 29.



DISPOSITIF PAR REFLEXION.

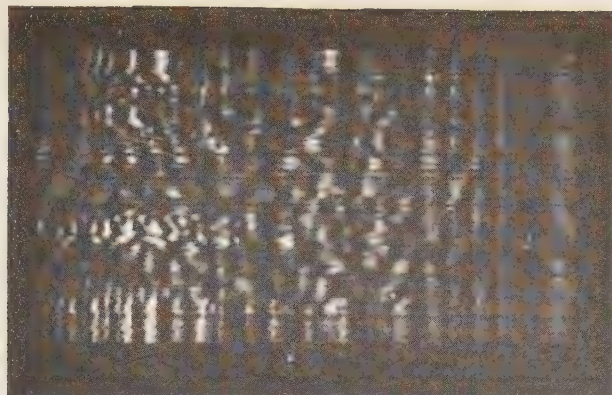


FIG.30 - Hologramme par réflexion de l'objet fig. 23

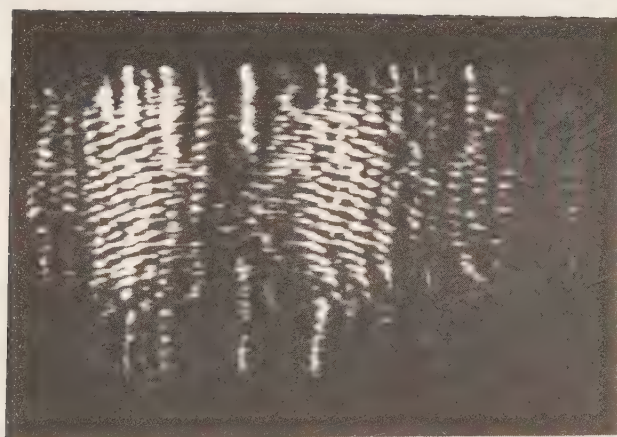


FIG.31 - Hologramme par réflexion de l'objet fig. 20

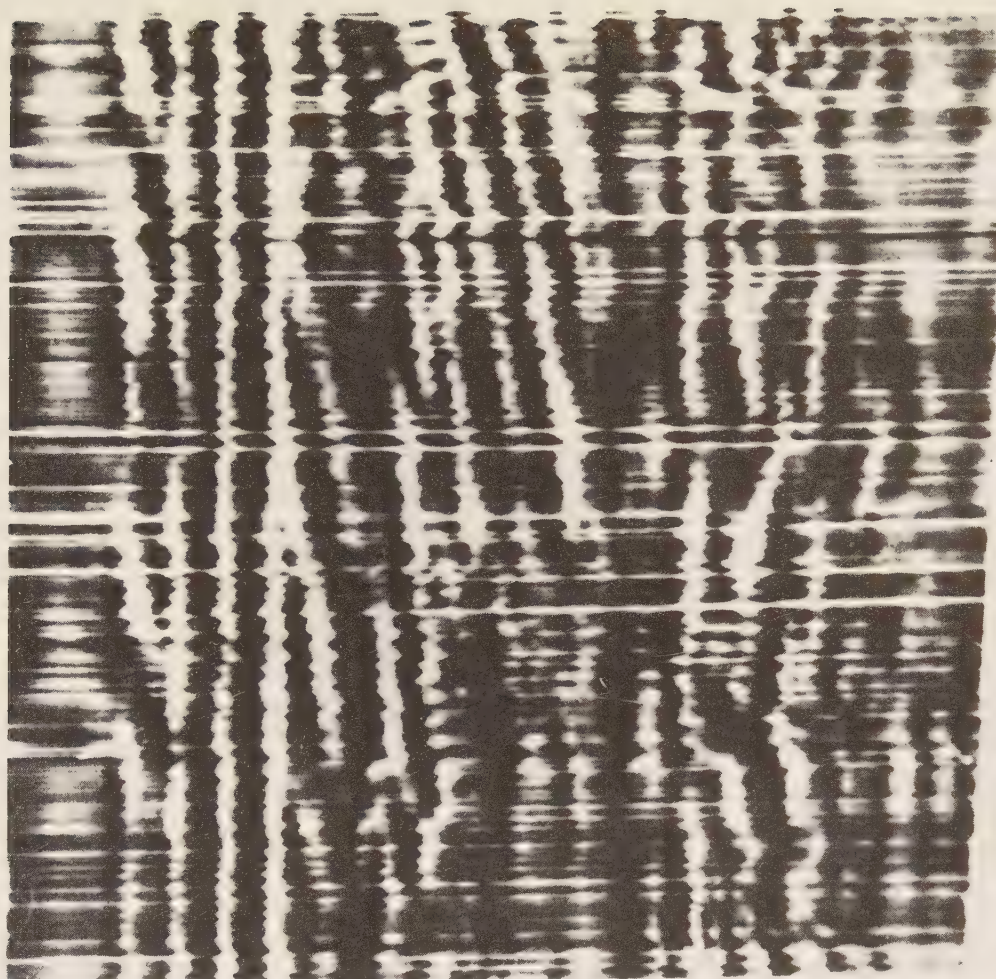


FIG.32 - Hologramme par réflexion de l'objet fig. 26

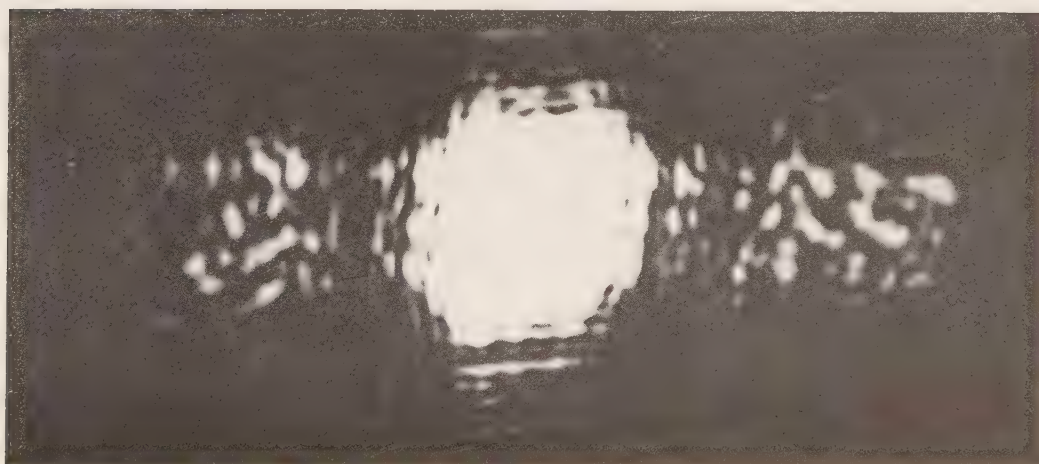


FIG.33-Restitution

Nous remarquons toujours l'existence des franges parallèles, dues aux réflexions sur les parois de la cuve. Ces franges sont assez intenses (car n'oublions pas que le récepteur est autant sensible aux ondes constituant le bruit, qu'aux ondes d'information.

La figure 36 montre la restitution de l'anneau, l'image n'est pas de très bonne qualité.

La figure 37 montre un autre hologramme de l'anneau enregistré dans les mêmes conditions que précédemment, sauf que l'objet n'est plus à 20 cm, mais à 21 cm. (Cette distance est mesurée entre le centre de la sonde et l'objet).

La figure 38 montre le spectre donné par le balayage.

La figure 39 montre la restitution. On pourrait croire que l'image est de meilleure qualité que la précédente, mais c'est simplement une question d'échelle, (la photographie de l'image de l'anneau est plus grande que la précédente).

b) Le deuxième objet holographié est une grille de grandes dimensions (110 mm x 450 mm) à laquelle nous avons donné une forme cylindrique de façon à minimiser l'effet de déphasage introduit par le mouvement

L'hologramme est donné par la figure 40

La restitution est donnée par la figure 41

c) Le troisième objet holographié est le morceau de grés avec 5 trous.

La figure 42 représente l'hologramme.

La figure 43 montre la restitution.

d) Le quatrième objet holographié est le morceau de grés sans trous.

L'hologramme est donné par la figure 44

La restitution est donnée par la figure 45

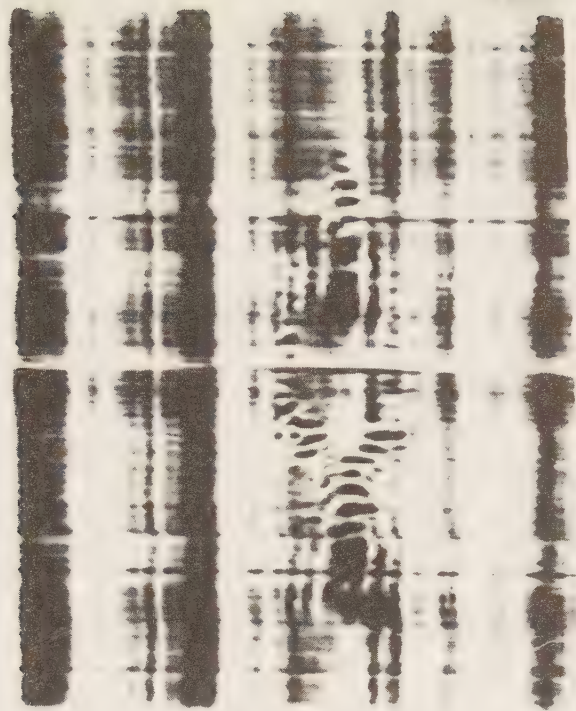


FIG.35 - Hologramme en balayage simultané
de l'objet fig. 34

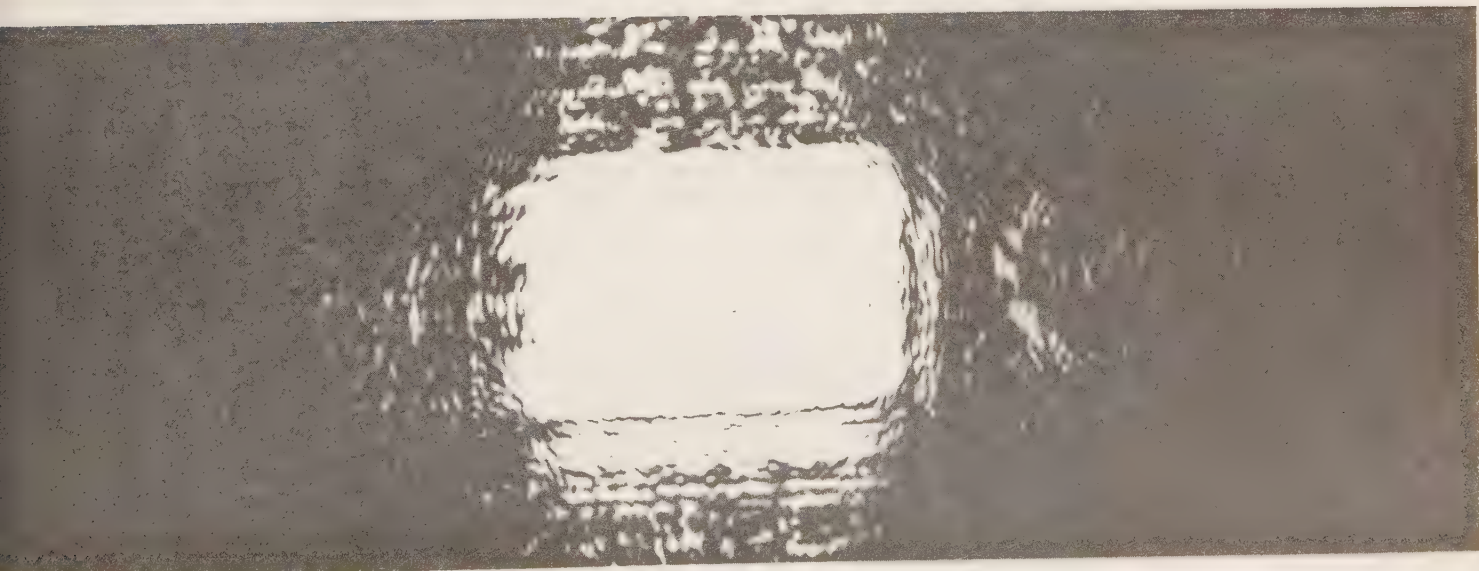


FIG. 36 - Restitution

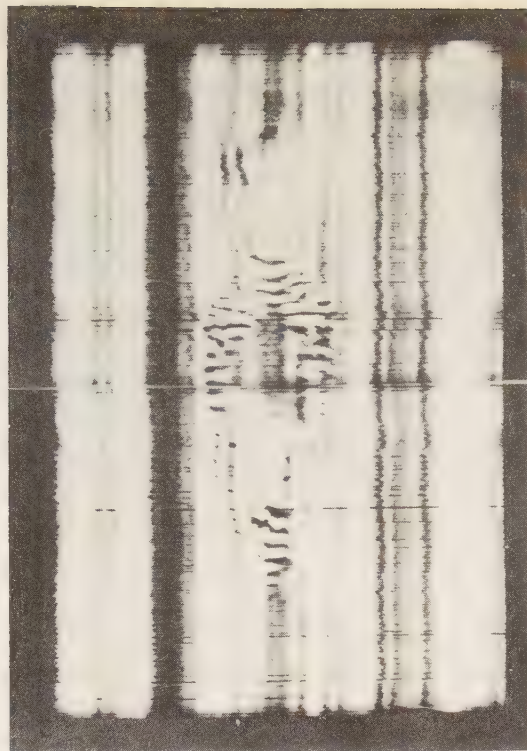


FIG. 37 - Hologramme en balayage
simultané de l'objet fig. 34

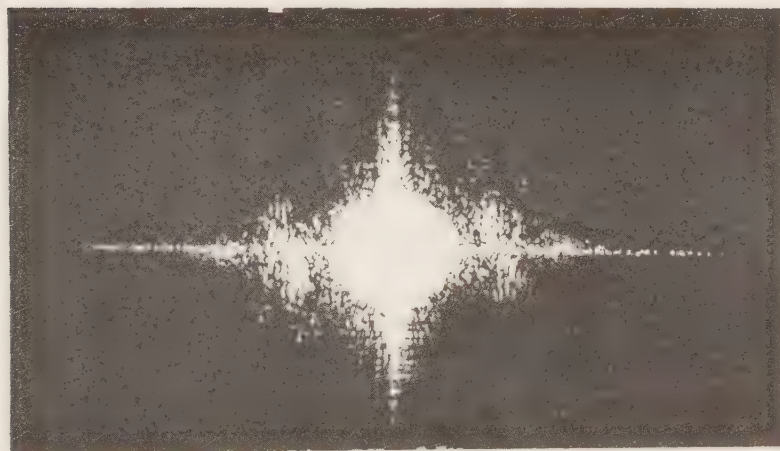


FIG. 38 - Spectre du linéage

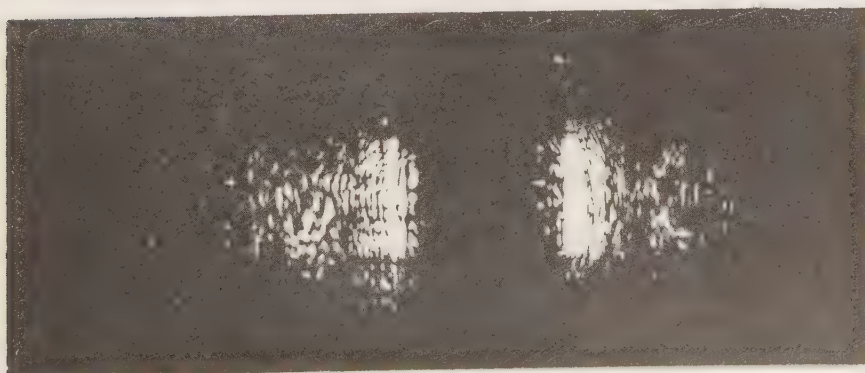


FIG. 39 - Restitution

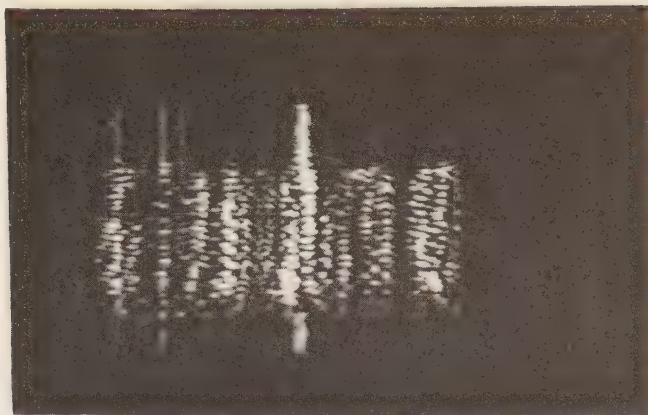


FIG. 40 - Hologramme en balayage simultané

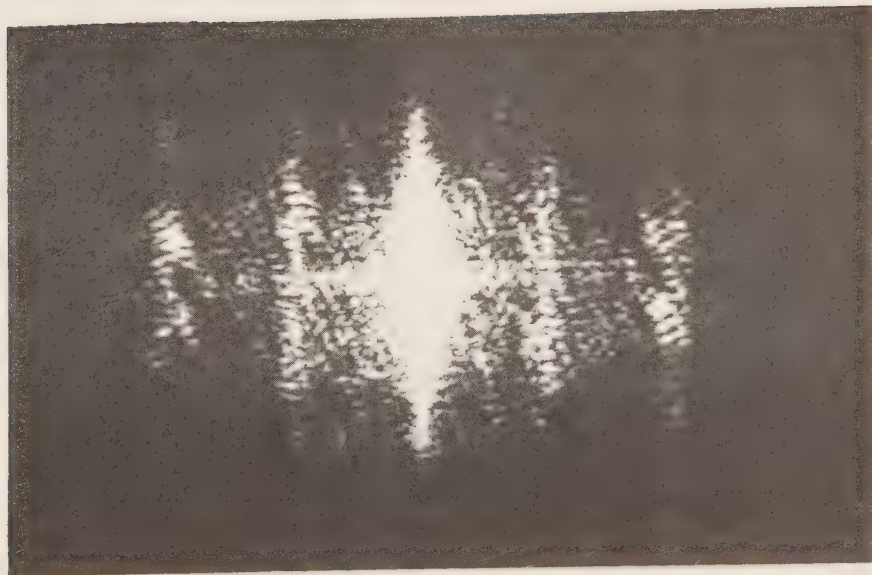


FIG. 41 - Restitution

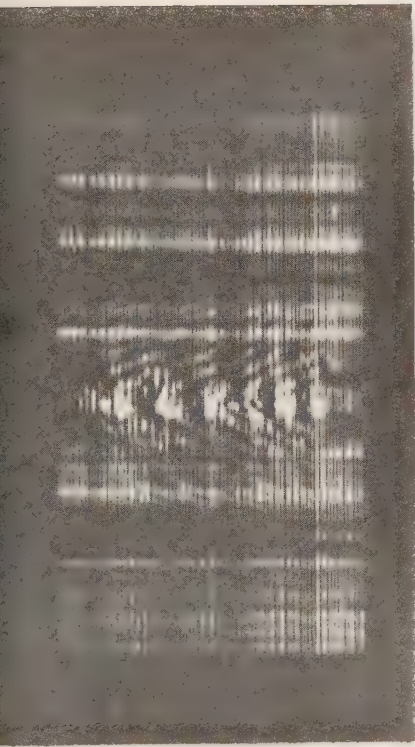


FIG. 42- Hologramme en balayage simultané de l'objet fig. 23



Restitution

FIG. 43

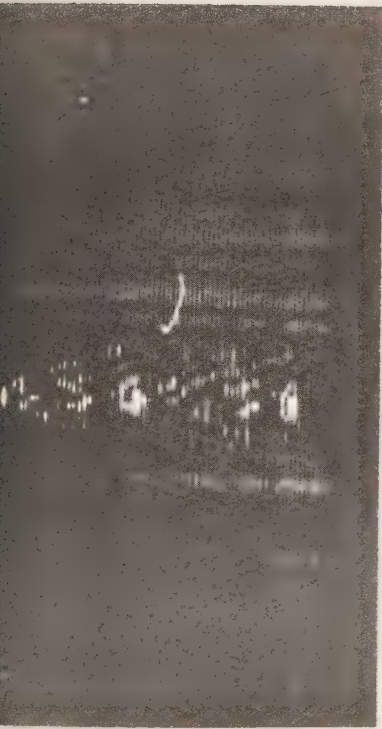
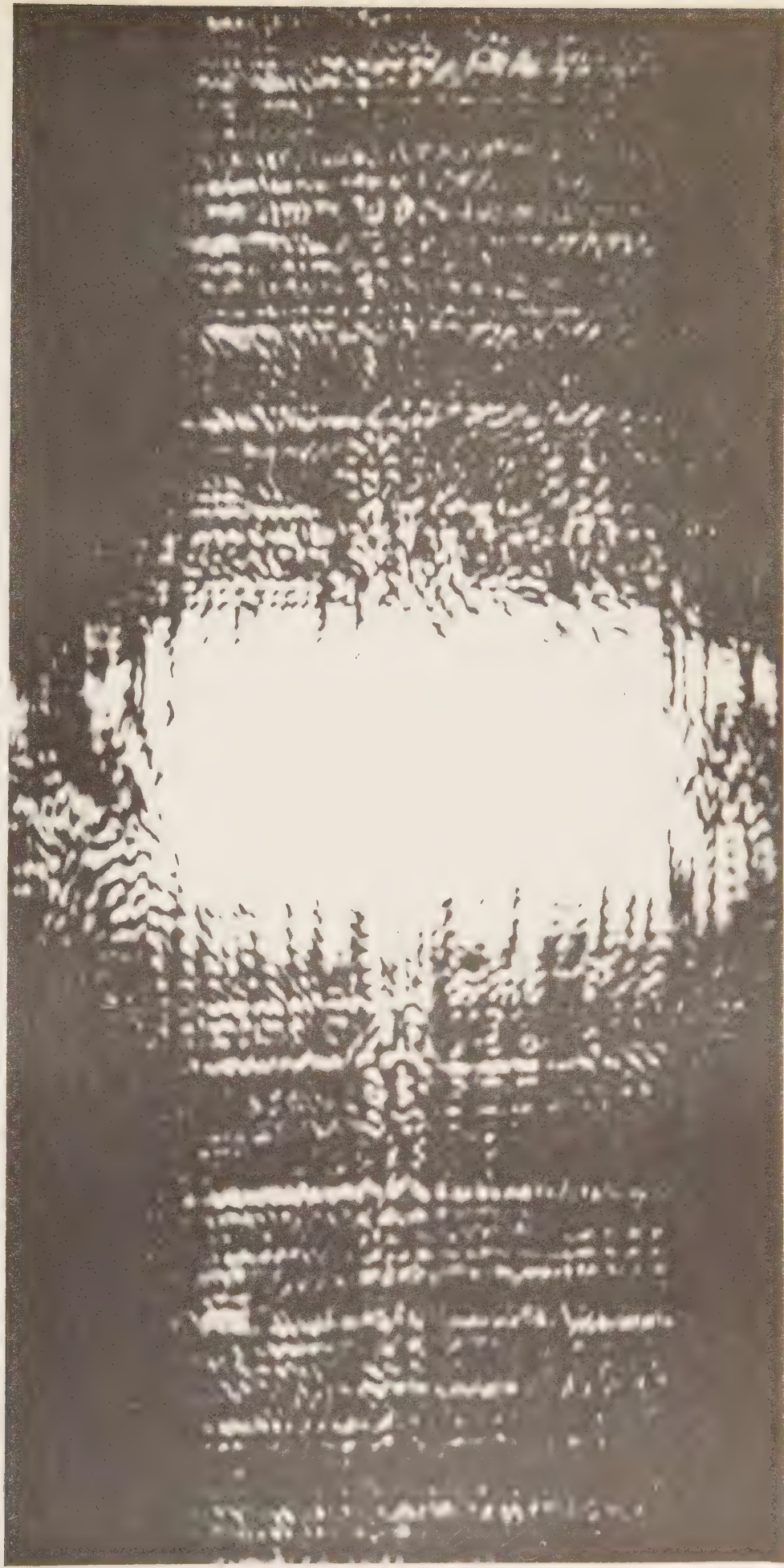


FIG.44 - Hologramme en balayage simultané de l'objet fig. 26



Remarques : En comparant les hologrammes enregistrés avec les différents dispositifs, nous voyons que l'information n'occupe pas la même surface sur les hologrammes.

Autant elle s'étale sur presque tout l'hologramme dans le cas des enregistrements par transmission et réflexion, autant elle occupe une surface approximativement égale à celle de l'objet dans le cas du balayage simultané.

VII. PROJET DE SONDE HOLODIAGRAPHIQUE

Sonde holodiagraphique proposée (fig. 46)

Elle se compose de deux parties bien distinctes.

a) Partie acoustique ou (émission et réception)

C'est un dispositif bien connu en acoustique appliqué au sondage.

Nous avons un cylindre sur lequel sont fixés les transducteurs (émetteur , récepteur).

L'émetteur (4) et le récepteur (5) sont contenus dans un appel (12) de diagraphie.

L'émetteur et le récepteur qu'on appellera tête de sonde sont montés de façon à tourner en continu sous l'action d'un moteur (6).

Un système classique peut être utilisé pour donner la position angulaire de l'émetteur et du récepteur (7) (soit une boussole d'induction, soit un transmetteur synchrone, soit un potentiomètre.)

Quant au balayage vertical, il est assuré, soit par un treuil à la surface, soit par une vis sans fin, sur laquelle est montée la tête de sonde, soit par un autre système.

b) Partie électronique : (appelée communément cartouche électronique).

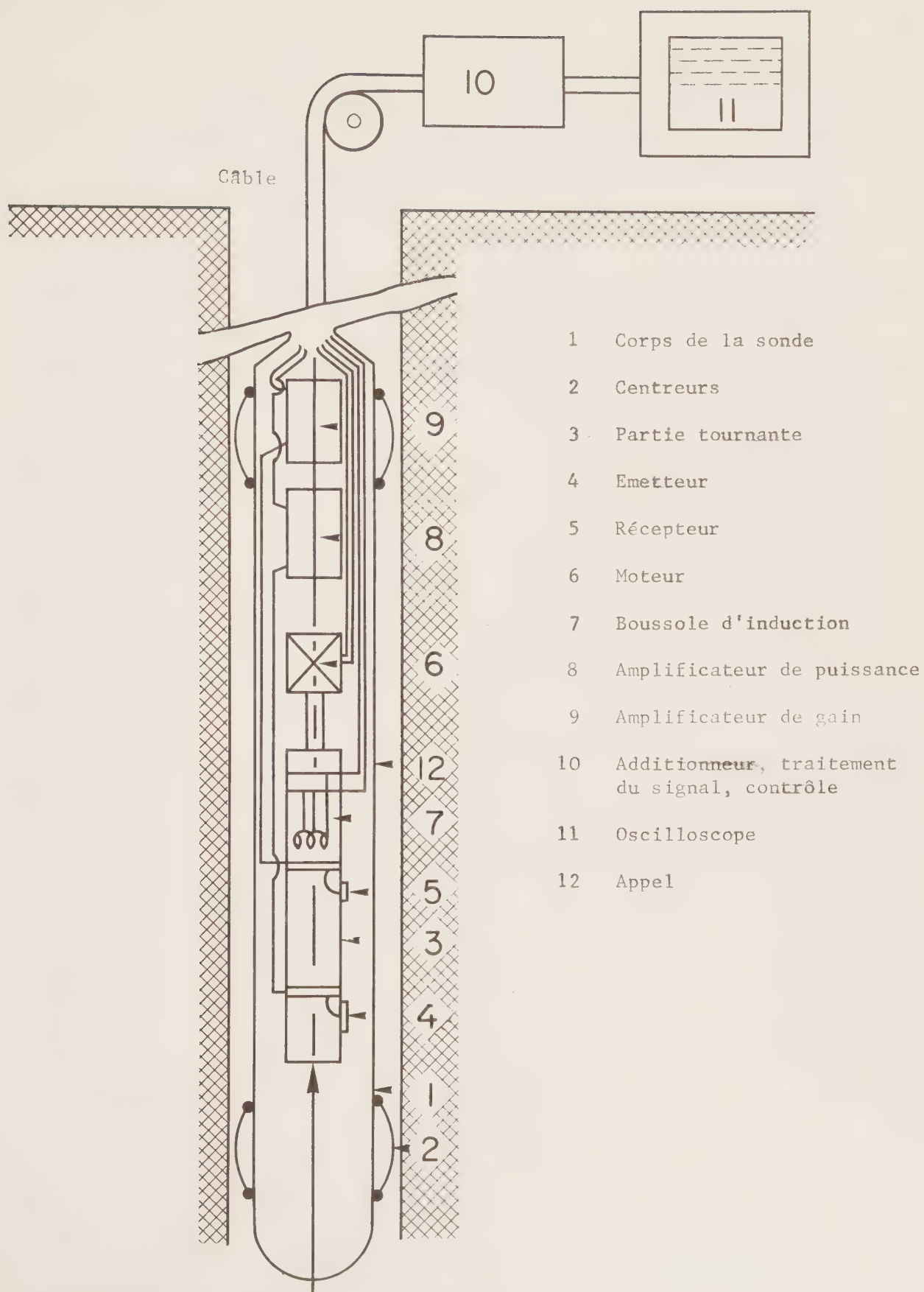
Cette cartouche qui sera placée au dessus de la tête de sonde comprendra :

- un générateur à sortie stable pouvant travailler sur plusieurs fréquences entre 10 KHZ - 2 MHz.
- un amplificateur de puissance dont la sortie va directement sur l'émetteur.
- un amplificateur de gain, pour amplifier le signal de réception.
- un 'additionneur' pour additionner le signal de réception avec un signal pris directement sur l'oscillateur (ce signal pris sur l'oscillateur peut être déphasé).

c) Appareillage de surface

Le signal de sortie de l'additionneur est envoyé vers la surface, où il peut être exploité de deux manières différentes :

FIG. 46.



1) - Il est traité par un dispositif complexe de détection, d'amplification, d'écrtage pour ensuite moduler le spot d'un tube cathodique sur lequel est montée une caméra qui nous fournira l'hologramme. Bien entendu le système de positionnement de l'émetteur et du récepteur, autant en rotation qu'en profondeur, est connecté au tube cathodique de façon à être en synchronisme avec le spot du tube.

2) - Il peut être enregistré sur une bande magnétique qu'on traitera par la suite ; le signal est relu, traité et transformé en énergie lumineuse, en modulant soit un tube cathodique, soit une lampe, soit traité directement à l'ordinateur (ces techniques sont assez bien connues en sismique et en diagraphie). Le film obtenu est réduit dans des proportions convenables.

d) La partie de la restitution est faite en laboratoire et non sur le chantier.

VIII. CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons démontré la possibilité d'obtenir des hologrammes avec les dispositifs de balayage classique et simultané, suivant une géométrie de balayage semi-cylindrique.

Les images restituées ne sont pas de très bonnes qualité, et ceci est dû comme nous l'avons expliqué à un bruit de fond provenant des réflexions sur la paroi de la cuve, à une réduction sur l'oscilloscope qui n'est pas la même dans les deux directions du balayage, au déphasage introduit par le mouvement, et aux aberrations classiques.

Par ailleurs, la réduction de l'hologramme n'est pas égale au rapport des longueurs d'ondes, ce qui nous donne des images assez éloignées en fonction de ce rapport ; d'où la mauvaise définition de l'image.

Certains problèmes peuvent être résolus dans la pratique ; d'une part le sondage étant circulaire, il n'y aura plus d'effet sur l'image en ce qui concerne le mouvement (mais si la restitution s'effectue avec un hologramme plan, nous aurons une transformation qui nous fera correspondre une droite à toute courbe ; de la forme de celle calculée dans la partie déphasage). D'autre part, en travaillant sur une fréquence plus élevée, on arrivera à minimiser le rapport des longueurs d'ondes (bien que ceci corresponde à une atténuation plus grande).

D'après cette étude, et en améliorant le traitement de l'information, il est possible de construire une sonde holodiagraphique.

A N N E X E

LINEARITE DU DISPOSITIF UTILISE.

a) Balayage

Le balayage est linéaire à 5 % approximativement comme le montrent les figures 47, 47 bis.

Tous les hologrammes que l'on a enregistrés avec le dispositif (micro-contact, potentiomètre) ont donné de très bons spectres du linéage, comme c'est le cas de l'hologramme de l'anneau dont nous avons donné le spectre (figure 38).

Parfois nous avons un saut de ligne sur les hologrammes, ceci est dû au potentiomètre bobiné (10 tours).

b) Appareillage d'électronique

Pour voir la stabilité de notre dispositif électronique, nous avons enregistré un signal avec le dispositif de la figure 48 , et un signal avec le dispositif de la figure 16 , qui est en fait le dispositif classique que l'on a utilisé pour l'enregistrement de nos hologrammes.

En comparant ces deux signaux, nous voyons que le signal reste stable (avec une faible erreur). (fig. 49, 50, 51).

c) Réglage du spot sur le tube cathodique

Celui-ci est fait en fonction de la courbe, liant la brillance à la tension d'attaque du whenelt (fig. 52) tout en tenant compte des caractéristiques du tube cathodique (astigmatisme, concentration) vu que le tube utilisé est un écran plat, donc sensible aux réglages ci-dessus, car la forme du spot varie d'une position à l'autre sur ce même écran.

Remarques : La brillance est définie par rapport à une tension d'anode donnée.

En l'absence de toute information , nous avons une brillance qui est la brillance de référence (fixée arbitrairement) de façon qu'en présence d'information, nous n'ayons ni une saturation, ni une perte d'information.

Ceci aura comme conséquence de se trouver toujours dans la dynamique du film (type polaroid 55 P/N).

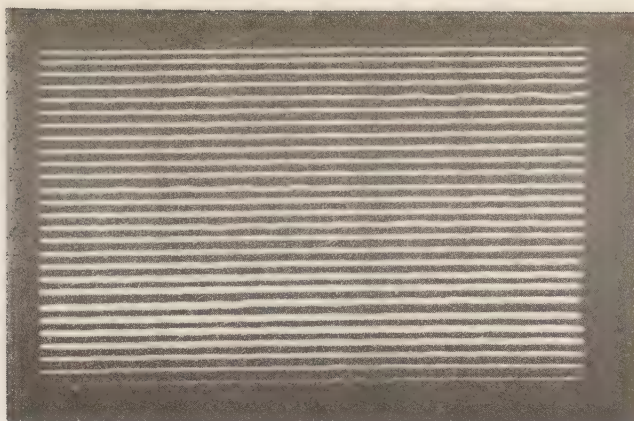


FIG. 47

STABILITE DU BALAYAGE

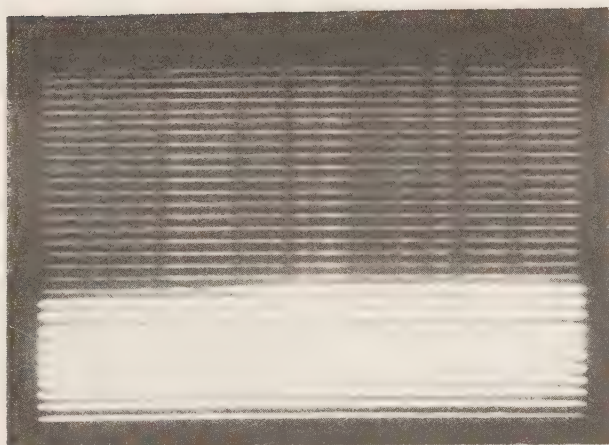


FIG. 47 bis

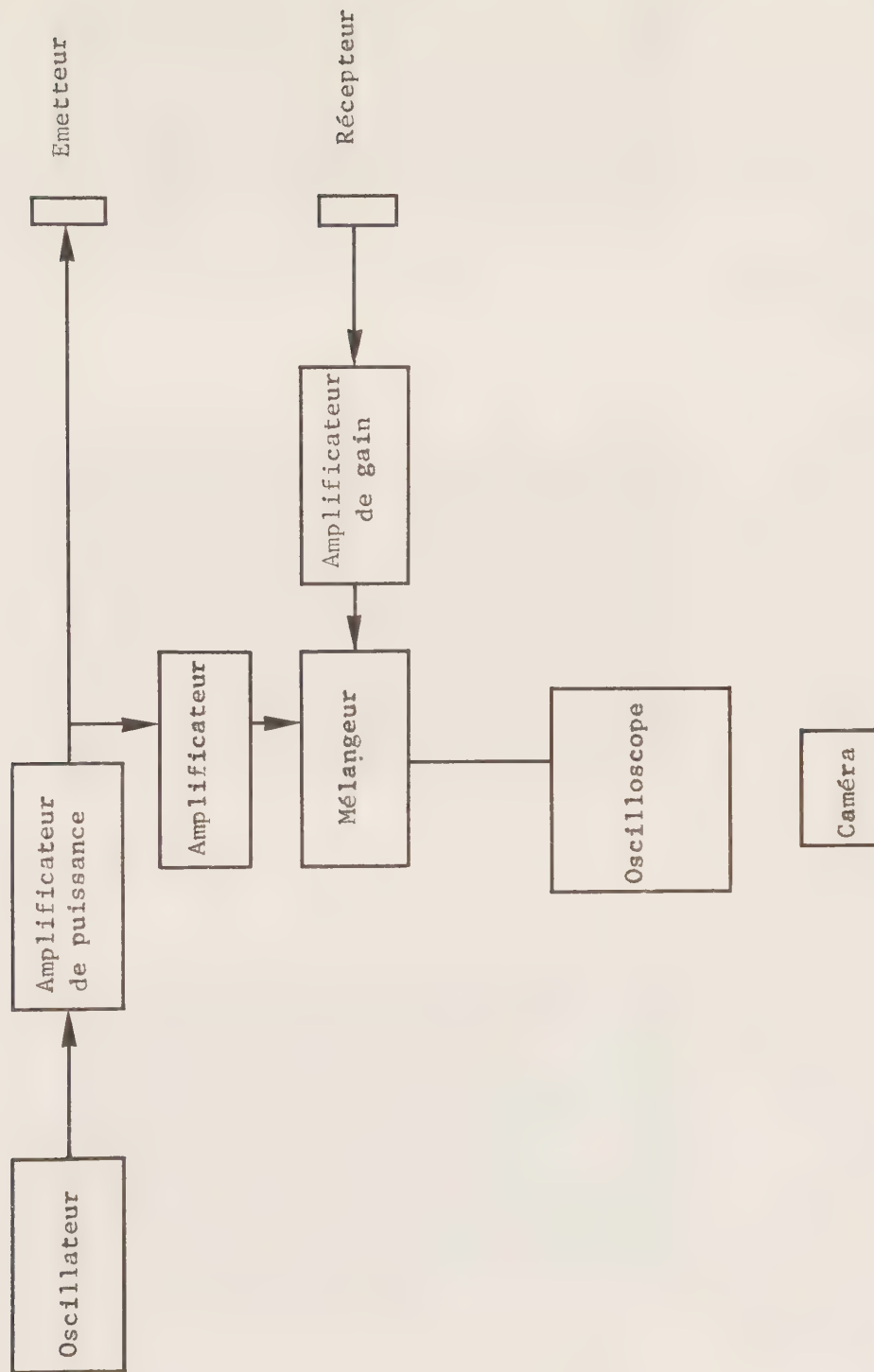
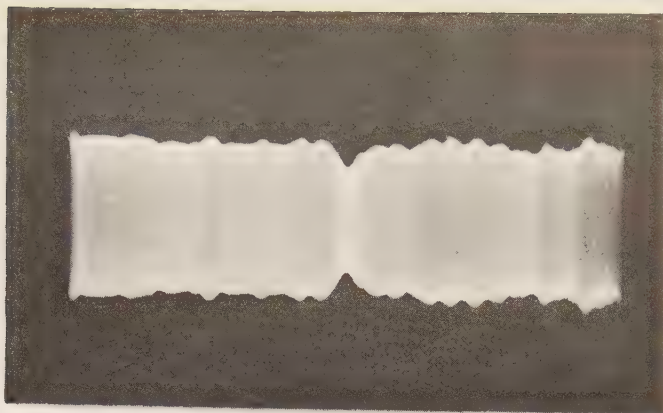
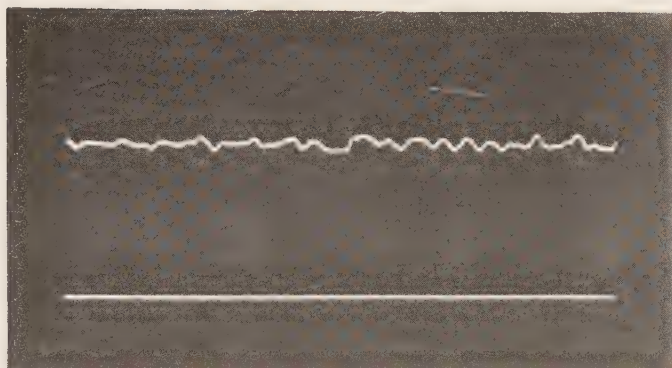


FIG. 48



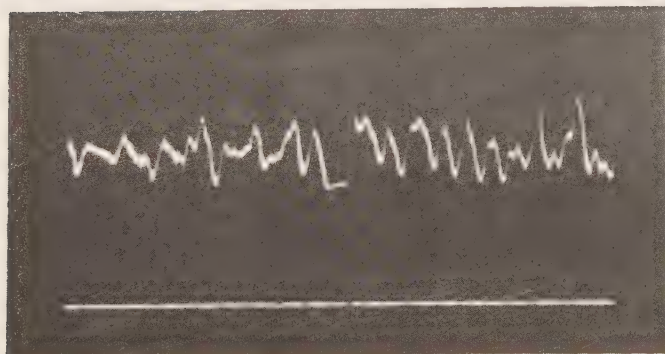
Signal sans traitement.

FIG. 49



Signal après traitement

FIG. 50



Signal amplifié après traitement

FIG 51

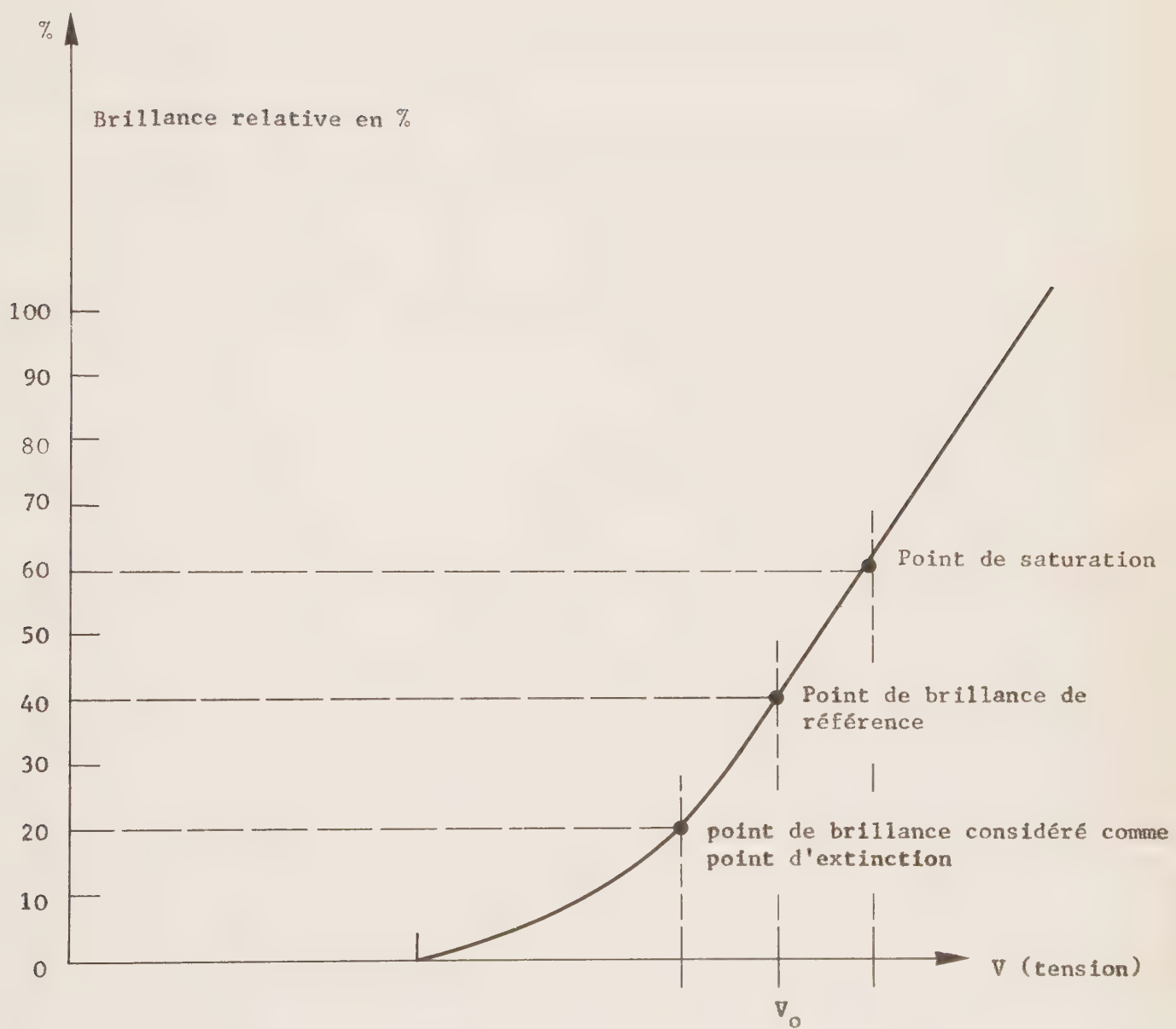


FIG. 52

d) Réglage des gains des amplificateurs .

En fait, la variation de la brillance (ou intensité lumineuse) du spot du tube cathodique est aussi liée aux gains affichés sur les amplificateurs (de réception, d'addition et de traitement).

Pour cela, nous avons enregistré quatre signaux qui sont les mêmes, mais avec des gains différents (fig. 53). Nous remarquons que plus la valeur du gain est faible, plus l'information est atténuée ; plus elle est forte, plus l'information apparaît dans ses détails.

Avec ces différents gains affichés, et en conservant toujours la même brillance de référence du spot, nous avons enregistré des hologrammes d'un même objet, dans les mêmes conditions géométriques et acoustiques (fig. 54).

Nous voyons que l'on passe d'un cas extrême à l'autre :

- pour l'un, il y a saturation, pour l'autre presque pas d'information.

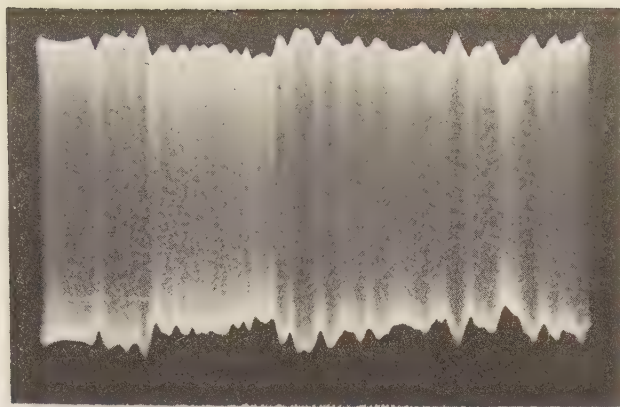
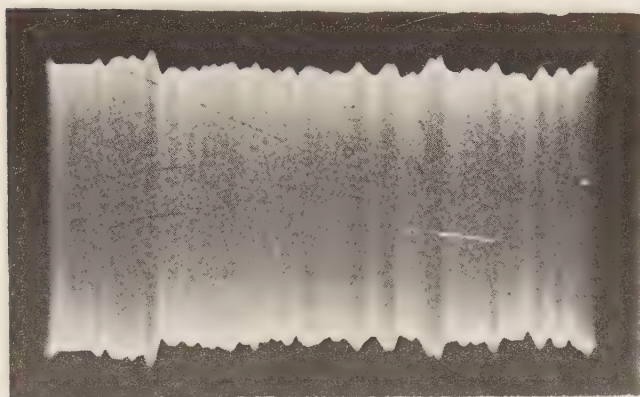
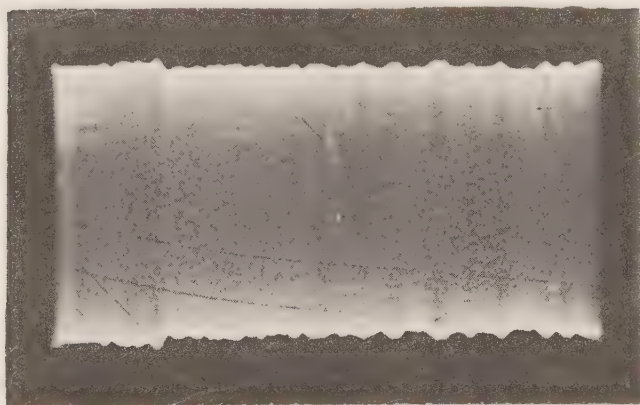


FIG. 53

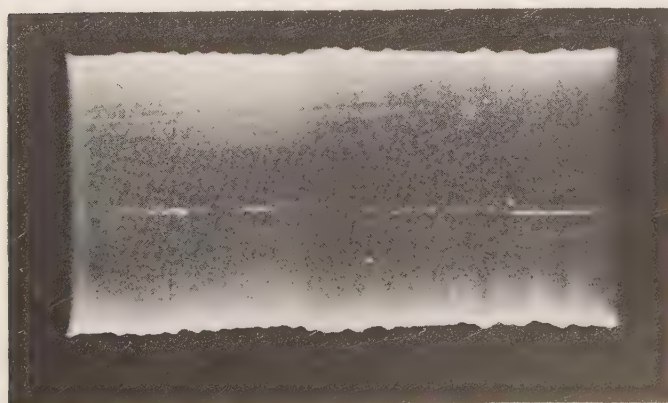
Signal avec grain fort



Signal avec grain moins fort



Signal avec grain faible



Signal avec grain très faible

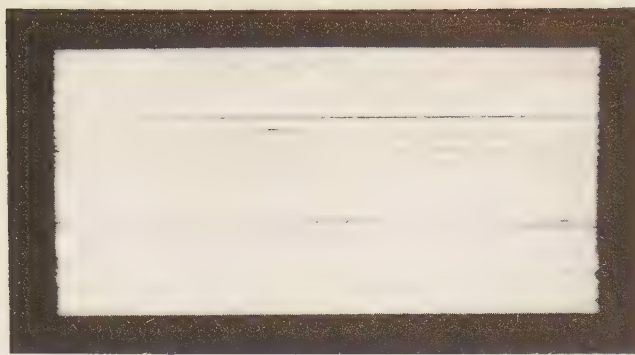
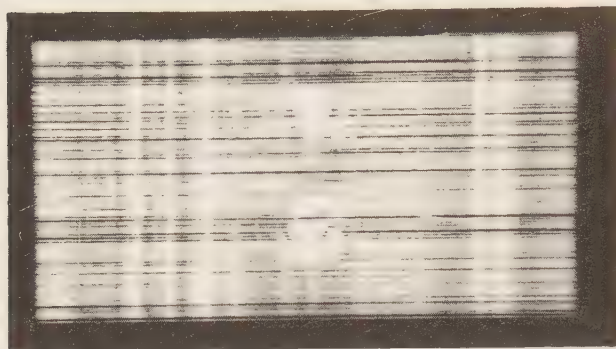
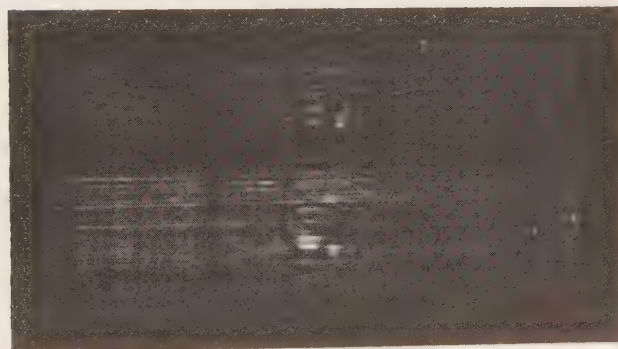


FIG. 54

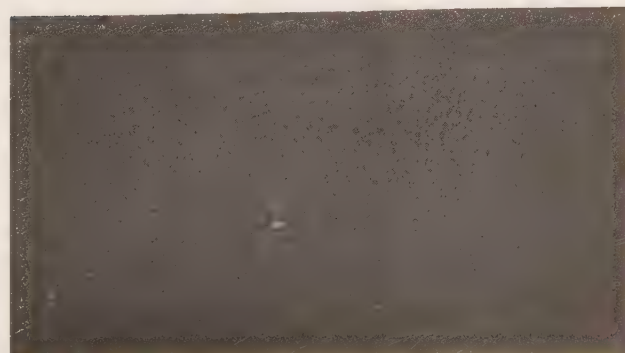
Hologramme avec grain très fort



Hologramme avec grain moins fort



Hologramme avec grain faible



Hologramme avec grain très faible

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. J. ZEMANECK - New acoustical tool scans well bore.
The Oil and Gas Journal - 2 décembre 1968, p. 42-43.
2. GABOR - A new microscope principle.
Nature Vol. 161, p. 177 (1948).
3. LEITH et UPTATNIEKS - Reconstructed wavefronts and communication theory. J.O.S.A. Vol. 52 (1962).
4. GABOR, STROKE - L'holographie et ses applications.
Endeavour - janvier 1969, p. 40-47.
5. HALSTEAD - Ultrasound holography. Ultrasonics for industry 1967 - avril 1968, p. 79-87.
6. METHEREL, EL.SUM, DREHER, LARMORE - Introduction to acoustical holography. J.A.S.A., octobre 1967, p. 733-742.
7. BORN, WOLF - Principles of optics (fourth editions 1970)
(Pergamon press), p. 453-455.
8. SMITH - Ultrasonic imaging using a scanned hologram method.
BNWL - SA - 1362, Octobre 1967.
9. CHAMPAGNE - Non paraxial imaging, magnification, and aberration properties in holography. J.O.S.A. Vol. 57, n° 1, janvier 1967, p. 51-55.
10. MEIER - Magnification and third-order aberrations in holography.
J.O.S.A., Vol. 55, n° 8, août 1965, p. 987-992.
11. METHERELL, EL.SUM, DREHER, LARMOTE - Introduction to acoustical holography. J.A.S.A., octobre 1967, p. 733-742.
12. B.B. BRENDEN - A comparison of acoustical holography methods
Battelle Institute. BNWL - SA - 1517 Rev., 12 juin 1968.
13. BRENDEN - Acoustical holography at a tool for nondestructive testing. Battelle Institute. BNWL - SA - 1912, août 1968.
14. MUELLER, MAROM, FRITZLER - Some problems associated with optical image formation from acoustic holograms.
Applied optics Vol. 8, n° 8, août 1969, p. 1537-1542.

15. MAROM, FRITZLER, MUELLER - Ultrasonic holography by electronic scanning of a piezoelectric crystal. Applied physics letters, 15 janvier 1968, p.26-28.
16. KORPEL, DESMARES - Rapid sampling of acoustic hologram by laser-scanning technique. J. P. S. A. 45, n° 4, p. 881-884.
17. MASSEY - Acoustic imaging by holography - I. E. E. E. Transactions on sonics and ultrasonics. Vol. SU - 15, n° 3, juillet 1968.
18. METHERELL, SPINAK, PISA - Temporal reference acoustical holography. Second. int. Symp. on acoust. holog. Huntington Beach (march).
19. R. B. SMITH et B. B. BRENDEN - Refinements and variations in liquid surface and scanned ultrasound holography. Battelle Institute BNWL - SA - 1972, Septembre 1968.
20. HILDEBRAND, HAINES - Simultaneous object illumination, scanning and detector scanning in holography. Ohysics letters Vol. 27 a, août 1968, p. 376.
21. R. B. SMITH et B. B. BRENDEN - Refinements and variations in liquid surface and scanned ultrasound holography. Battelle Institute BNWL - SA - 1972, Septembre 1968.
22. HILDEBRAND, HAINES - Holography by scanning. J. O. S. A., janvier 1969.
23. MUELLER, MAROM, FRITZLER - Some problems associated with optical image formation from acoustic holograms. Applied optics Vol. 8, n° 8, août 1969, p. 1537-1542.
24. L. GUIYESSE et P. SABATHE - Acoustique sous-marine. Dunod, 1964.
25. HILDEBRAND - Effect of high scanning velocities on the holographic imaging. J. O. S. A., vol. 60, n°9, septembre 1970, p. 1166-1168.

REFERENCES DE BASE

- J. B. De VELIS et G. O. REYNOLDS - Theory and application of holography. Addison-Wesley, Reading, Mass 1967.
 - METHEREL, LARMORE, DREHER - Acoustical holography. Vol. 1, 2. Plenum Press, 1969, 1970.
 - STROKE - An introduction to coherent optics and holography. New-York, Academic Press (1966).
 - FRANÇON - Holographie. Masson et Cie, éditeur, 1969.
-



Vu et Approuvé

PARIS, le 16 Juillet 1971

Le Président

de l'Université de PARIS VI

A handwritten signature in dark ink, consisting of several overlapping loops and strokes.

